

Universidade de Lisboa
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



**Padrões de vulnerabilidade estrutural em estradas e edifícios
associados à ocorrência de movimentos de vertente**

Carlos José Simões Alves

Dissertação orientada
pelo Doutor Sérgio Manuel Cruz de Oliveira

Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território

2018

Universidade de Lisboa
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



**Padrões de vulnerabilidade estrutural em estradas e edifícios
associados à ocorrência de movimentos de vertente**

Carlos José Simões Alves

Dissertação orientada
pelo Doutor Sérgio Manuel Cruz de Oliveira

Júri:

Presidente: Professor Doutor Ricardo Alexandre Cardoso Garcia do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa;

Vogais:

- Professor Doutor Alexandre Manuel de Oliveira Soares Tavares da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra;
- Doutor Sérgio Manuel Cruz de Oliveira do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa.

2018

Esta dissertação foi realizada no âmbito do projeto BeSafeSlide – Protótipo de sistema de alerta para movimentos de vertente de baixo custo para melhorar a resiliência da comunidade e adaptação às mudanças ambientais (PTDC/GES-AMB/30052/2017) financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.

*“Look above the level of things around you and see a higher aim
and possibility to your work”*

Sir Robert Baden-Powell

*Aos meus pais e irmã, José Carlos, Laura e Joana,
a ti, Margarida,
a toda à minha restante família e amigos,
ao meu orientador Professor Doutor Sérgio Oliveira
e a todos os que deram um pouco de si a mim,
o meu muito Obrigado.*

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABELAS.....	xv
RESUMO.....	xix
<i>ABSTRACT</i>	xxi
ABREVIATURAS.....	xxiii
 INTRODUÇÃO.....	 1
 CAPÍTULO 1. MOVIMENTO DE VERTENTE, ELEMENTOS EXPOSTOS E AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE FÍSICA	 5
1.1 MOVIMENTOS DE VERTENTE.....	5
1.2 ELEMENTOS EXPOSTOS.....	6
1.3 VULNERABILIDADE E VULNERABILIDADE FÍSICA.....	9
1.4 ESTRATÉGIAS UTILIZADAS NA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE FÍSICA.....	13
 CAPÍTULO 2. ÁREA DE ESTUDO – BACIA DO RIO GRANDE DA PIPA.....	 17
2.1 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO.....	17
2.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA.....	18
2.3 CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E INSTABILIDADE DE VERTENTES..	22

CAPÍTULO 3. INFORMAÇÃO CARTOGRÁFICA E DADOS DE BASE.....	25
3.1 INFORMAÇÃO CARTOGRÁFICA.....	25
3.2 INVENTÁRIO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE E SELEÇÃO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE QUE GERARAM DANOS EM ESTRADAS E EDIFÍCIOS.....	26
3.3 FATORES DE PREDISPOSIÇÃO.....	30
PERFIL TRANSVERSAL.....	30
EXPOSIÇÃO.....	32
DECLIVE.....	33
IWI – INVERSO DO <i>WETNESS INDEX</i>	34
SOLO.....	35
USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	37
3.4 TIPOLOGIA, DISTRIBUIÇÃO DAS ESTRADAS E DOS EDIFÍCIOS E EXPOSIÇÃO A MOVIMENTOS DE VERTENTE.....	38
 CAPÍTULO 4. METODOLOGIA.....	 45
4.1 GRAU DE PERDA E TIPOLOGIA DE DANOS EM EDIFÍCIOS E ESTRADAS.....	46
4.1.1 ABORDAGEM GRAUPERDA1.....	46
4.1.2 ABORDAGEM GRAUPERDA2.....	49
4.1.2.1 CRITÉRIOS PARA A DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE DANOS, GRAU DE PERDA E TIPOLOGIA DE DANOS EM ESTRADAS.....	49
(I) ABERTURA DE FISSURAS/FENDAS DE TRAÇÃO NO PAVIMENTO DA VIA.....	50
(II) O DESNÍVEL VERTICAL DE FRATURAS.....	51

(III) A AMPLITUDE DE ONDULAÇÃO DO PAVIMENTO DA VIA.....	51
(IV) O TEMPO DE INTERRUPÇÃO/CONDICIONAMENTO DA CIRCULAÇÃO.....	57
(V) A PERDA DE RESISTÊNCIA DO SUPORTE LATERAL DA ESTRADA EM ATERRO	58
(VI) ACUMULAÇÃO DE MATERIAL.....	59
4.1.2.2 CRITÉRIOS PARA A DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE DANOS, GRAU DE PERDA E TIPOLOGIA DE DANOS EM EDIFÍCIOS.....	64
(I) ABERTURA E DESNÍVEL LATERAL DE FENDAS/FRATURA.....	64
(II) ACUMULAÇÃO DE MATERIAL.....	65
(III) FUNCIONALIDADE	66
4.2 FATORES CONDICIONANTES DA VULNERABILIDADE FÍSICA.....	68
(I) TIPOLOGIA DE ESTRADAS E EDIFÍCIOS.....	68
(II) TIPOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE ESTRADAS E EDIFÍCIOS EM FUNÇÃO DOS DIFERENTES SETORES INTERNOS DOS DESLIZAMENTOS.....	68
(III) MAGNITUDE/INTENSIDADE DOS MOVIMENTOS DE VERTENTE.....	69
4.3 CHECKLIST PARA A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE FÍSICA.....	70
4.4 CURVAS DE FRAGILIDADE.....	73
4.5 SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE.....	74
4.6 EXPOSIÇÃO A MOVIMENTOS DE VERTENTE E CENARIZAÇÃO DE EXPOSIÇÃO/PERDAS POTENCIAIS.....	76

CAPÍTULO 5. RESULTADOS	79
5.1 AVALIAÇÃO DE DANOS E DETERMINAÇÃO DE PADRÕES DE DEFORMAÇÃO EM ESTRADAS E EDIFÍCIOS.....	79
5.1.1. ESTRADAS – ABORDAGENS GRAUPERDA1 E GRAUPERDA2.....	79
(I) GRAU DE PERDA ASSOCIADO A DESLIZAMENTOS POR TIPO DE ESTRADA.....	80
(II) GRAU DE PERDA ASSOCIADO AOS DIFERENTES SETORES DOS DESLIZAMENTOS.....	83
5.1.1.1. RELAÇÃO ENTRE ÁREA, VOLUME E PROFUNDIDADE DA SUPERFÍCIE DE ROTURA DOS DESLIZAMENTOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR O GRAU DE PERDA EM ESTRADAS.....	86
5.1.2. EDIFÍCIOS – ABORDAGENS GRAUPERDA1 E GRAUPERDA2	88
5.1.2.1 RELAÇÃO ENTRE ÁREA, VOLUME E PROFUNDIDADE DA SUPERFÍCIE DE ROTURA DOS DESLIZAMENTOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR O GRAU DE PERDA EM EDIFÍCIOS.....	92
5.2. INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE FÍSICA.....	96
5.2.1. DISPERSÃO DOS VALORES DE GRAU DE PERDA EM FUNÇÃO DA INTENSIDADE DOS DESLIZAMENTOS.....	96
5.2.2. CURVAS DE FRAGILIDADE PARA ESTRADAS E EDIFÍCIOS AFETADOS POR DESLIZAMENTOS.....	99
5.2.3. “MATRIZES” DE VULNERABILIDADE PARA ESTRADAS E EDIFÍCIOS AFETADOS POR DESLIZAMENTOS.....	100
5.3. AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE NA BACIA DO RIO GRANDE DA PIPA.....	103
5.4 EXPOSIÇÃO A MOVIMENTOS DE VERTENTE E CENARIZAÇÃO DE EXPOSIÇÃO/PERDAS POTENCIAIS.....	111

CONCLUSÃO.....	121
REFERÊNCIAS	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Tipos de movimentos de vertente que tem originado mais danos em elementos expostos na região de Arruda dos Vinhos. Adaptado de Hugget (2007).....	5
Figura 1.2 - Componentes e fatores condicionantes da vulnerabilidade (adaptado de Léone, 1996, Fonte: Garcia, 2012)	7
Figura 1.3 - Tipologia de relações entre os diferentes setores dos movimentos de vertente (pé, cicatriz, topo) e a posição dos elementos expostos nesses diferentes setores, no caso em concreto para movimentos de vertente do tipo deslizamento. Adaptada de Oliveira <i>et al.</i> (2016).....	12
Figura 2.1 - Enquadramento geográfico da bacia do Rio Grande da Pipa (RGP).....	17
Figura 2.2 - Delimitação da bacia do Rio Grande da Pipa, modelo numérico de elevação (MNE) e rede hidrográfica.....	18
Figura 2.3 - Unidades litológicas da bacia do Rio Grande da Pipa. Adaptado da cartografia 1:50.000 da Folha 30-D (Alenquer) da Carta Geológica de Portugal (Zbyszewski e Assunção, 1965) e das Folhas 389 e 390 da Carta Geológica da Área Metropolitana de Lisboa na escala 1:25.000 (INETI, 2005).....	20
Figura 3.1 - Inventário de movimentos de vertente na bacia do Rio Grande da Pipa. Fonte: Oliveira (2012).....	27
Figura 3.2 - Inventário de movimentos de vertente que geraram danos em edifícios e estradas na bacia do Rio Grande da Pipa. Fonte: Oliveira (2012).....	28
Figura 3.3 - Deslizamentos ocorridos na bacia do Rio Grande da Pipa que originaram danos em estradas. A) Deslizamento rotacional com cicatriz a afetar mais de uma faixa de circulação de estrada rural, B) deslizamento translacional superficial no talude inferior de estrada nacional.....	29
Figura 3.4 – Perfil transversal na bacia do RGP expressa pelo perfil transversal das vertentes..	31
Figura 3.5 - Frequência relativa por classe do perfil transversal expressa das vertentes na bacia do RGP.....	31

Figura 3.6 - Exposição das vertentes na bacia do RGP.....	32
Figura 3.7 – Frequência relativa por classe de exposição das vertentes na bacia do RGP.....	33
Figura 3.8 - Declive em graus na bacia do RGP.....	33
Figura 3.9 - Frequência relativa por classe de declive na bacia do RGP.....	34
Figura 3.10 - Inverso do <i>Wetness Index</i> (IWI) na bacia do RGP.....	35
Figura 3.11 - Frequência relativa por classe de Inverso do <i>Wetness Index</i> (IWI) na bacia do RGP.....	35
Figura 3.12 - Tipo de solo na bacia do RGP.....	36
Figura 3.13 - Frequência relativa por classe de tipo de solo na bacia do RGP.....	36
Figura 3.14 - Uso do solo na bacia do RGP.....	37
Figura 3.15 - Frequência relativa por classe de uso do solo na bacia do RGP.....	38
Figura 3.16 - Rede viária por tipo de estrada na área do município de Arruda dos Vinhos que se enquadra na bacia do RGP.....	40
Figura 3.17 - Edifícios classificados como elementos vitais, estratégicos e sensíveis na área do município de Arruda dos Vinhos que se enquadra na bacia do RGP.....	40
Figura 3.18 - Frequência por tipologia de edifícios, sendo: A – E1. Edifícios com outros elementos resistentes (madeira, metal); B – E2. Edifícios com pedra de adobe ou taipa; C – E3. Edifícios com paredes de alvenaria argamassada (sem placa); D – E3. Edifícios com paredes de alvenaria argamassada (com placa); E – E4. Edifícios com elementos resistentes de betão. Fonte dados: INE (março de 2019).....	41
Figura 3.19 - Frequência relativa por tipo de edifício, sendo A – E1. Edifícios com outros elementos resistentes (madeira, metal); B – E2. Edifícios com pedra de adobe ou taipa; C – E3. Edifícios com paredes de alvenaria argamassada (sem placa); D – E3. Edifícios com paredes de alvenaria argamassada (com placa); E – E4. Edifícios com elementos resistentes de betão. Fonte dados: INE (março de 2019)	42
Figura 4.1 - Esquema metodológico para a avaliação da vulnerabilidade física e perdas potenciais de estradas e edifícios a movimentos de vertente do tipo deslizamento.....	45

Figura 4.2 - Abertura de fissuras/fraturas a afetar o pavimento e a estrutura da estrada. A) fendas com abertura até 5 cm; B) fendas com abertura entre 5 e 10 cm; C) fendas com abertura até 30 cm (topo da fotografia) e maior que 30 cm (base da fotografia).....	50
Figura 4.3 - Exemplo de possível condicionamento à circulação gerado por fenda no pavimento da via com 30 cm de abertura.....	51
Figura 4.4 - Desnível vertical de fraturas registado em estradas. A) Estrada de terra batida com desnível vertical máximo das fraturas superior a 30 cm; B) desnível vertical até 5 cm com ondulação do pavimento da via; C) desnível vertical até 5 cm sem ondulação do pavimento da via.....	52
Figura 4.5 - Separador de via não galgável/ lancil de segurança com aproximadamente 30 cm de altura em Lisboa (Av. Professor Egas Moniz). Imagem: Google Earth consultada em 20/06/2018.....	53
Figura 4.6 - Estrutura geral do pavimento rodoviário - Tipo de camadas da estrada. Adaptado do Instituto de Infraestruturas Rodoviárias. Fonte: Estradas de Portugal, 2009 – Pavimentação.....	53
Figura 4.7- (A) Abatimento do piso inferido a partir da espessura da camada de desgaste (B) e a partir da existência do número de camadas de desgaste.....	55
Figura 4.8 – Exemplo de segmento de estrada (estrada da Mata) deformado por um movimento de vertente e com evidências de posterior restauro e deformação pós-restauro.....	55
Figura 4.9 – Parâmetros considerados para descrever a geometria da deformação ondulatória do pavimento da via. a) altura; b) declividade e c) comprimento de onda.....	56
Figura 4.10 - Deformação curvilínea (ondulação) do pavimento da via. A) ondulação do pavimento entre 10-30 cm; B) ondulação do pavimento entre 10-30 cm; C) ondulação do pavimento superior a 30 cm.....	56

Figura 4.11 – Notícia que reporta custos indiretos no comércio e turismo devido a interrupção de estrada por um movimento de vertente - caso do Festival do Peixe do Rio. Fonte: Jornal de Noticias (2018), página visitada no dia 20/06/2018.....	58
Figura 4.12 – Deslizamento em talude de estrada, A) grau de perda de 0,4; B) grau de perda de 0,5.....	59
Figura 4.13 – Abordagem GrauPerda2 – Grau de perda entre 0,1 e 0,6 para situações de soterramento parcial ou total de estrada por depósito de deslizamento.....	62
Figura 4.14 – Abordagem GrauPerda2 – Grau de perda entre 0,1 e 1 para situações de deformação ou rotura parcial ou total de estrada.....	63
Figura 4.15 - Fendas e fraturas com desnível lateral em paredes e elementos estruturais de edifícios.....	64
Figura 4.16 - Exemplo de impacto do depósito do movimento de vertente com altura inferior a 0,5 m na base de uma casa em construção em Alenquer (grau de perda entre 0,1 e 0,2).....	65
Figura 4.17 - Tipologia de localização de edifícios e estradas em função dos diferentes setores internos dos deslizamentos: cicatriz (B1, R1), área de depleção (B2, R2), área de acumulação (B3, R3), e frente do deslizamento (B4, R4). Fonte: Oliveira <i>et al.</i> , 2016.....	69
Figura 4.18 - Deslizamento translacional.....	70
Figura 4.19 - Deslizamento rotacional.....	70
Figura 4.20 - <i>Checklist</i> para determinação do grau de perda (vulnerabilidade) de estradas a movimentos de vertente.....	71
Figura 4.21 - <i>Checklist</i> para determinação do grau de perda (vulnerabilidade) de edifícios a movimentos de vertente.....	72
Figura 5.1 – Grau de perda por tipo de estrada em função da magnitude dos movimentos de vertente (volume - m ³): A - Estradas rurais (V1); B - Caminho (V1a); C - Estrada Municipal (V2); D - Estrada Nacional (V3); E - Autoestrada (V4); F - Todas as estradas.....	81
Figura 5.2 – Deslizamento rotacional profundo ocorrido durante a construção da autoestrada A10. Fonte: Matos (2008).....	82

Figura 5.3 – Deslizamento rotacional ocorrido perto de Pedra do Ouro, sub-bacia de Santana da Carnota.....	82
Figura 5.4.1 - Grau de perda em estradas por setor interno e magnitude dos movimentos de vertente: A: cicatriz (R1), B: área de depleção (R2), C: área de acumulação (R3) e D: frente do deslizamento (R4).....	84
Figura 5.4.2 - Grau de perda ² em estradas por setor interno e magnitude dos movimentos de vertente.....	85
Figura 5.5 – Relação área (m ²) / volume (m ³) dos deslizamentos que originaram danos em estradas na bacia do RGP.....	86
Figura 5.6 – Relação profundidade da superfície de rotura (m) / volume (m ³) para deslizamentos na bacia do RGP.....	87
Figura 5.7 – Relação entre profundidade e área (m ²) da superfície de rotura (m) para deslizamentos na bacia do RGP.....	87
Figura 5.8 - Grau de perda por tipo de edifício em função da magnitude dos movimentos de vertente: A: Edifícios com pedra de adobe ou taipa (E2); B: Edifícios com paredes de alvenaria argamassada (E3); C: Edifícios com elementos resistentes de betão (E4); D: Todos os edifícios.....	89
Figura 5.9 - Grau de perda de 1 por deslizamento rotacional profundo ao longo da estrada da Mata na sub-bacia do rio Salema.....	89
Figura 5.10 - Grau de perda de 1 por deslizamento rotacional profundo na sub-bacia do rio Salema.....	90
Figura 5.11 – Grau de perda dos edifícios por setor interno e magnitude dos movimentos de vertente: A: cicatriz (B1), B: área de depleção (B2), C: área de acumulação (B3), D: frente/pé do deslizamento (B4).....	91
Figura 5.12 – Relação entre área (m ²) e volume (m ³) para deslizamentos na bacia do RGP.....	92
Figura 5.13 – Relação entre profundidade da superfície de rotura (m) e volume (m ³) para deslizamentos na bacia do RGP.....	93

Figura 5.14 – Relação entre área (m ²) e profundidade da superfície de rotura (m) para deslizamentos na bacia do RGP.....	93
Figura 5.15 – Deslizamento rotacional profundo ocorrido nos Casais da Capelã e distribuição dos edifícios afetados pelo deslizamento em 1989 e áreas afins.	95
Figura 5.16 – Casas afetadas pelo/na área do deslizamento rotacional ocorrido nos Casais da Capelã, em 1989. Registo de danos visíveis em 2017.....	96
Figura 5.17 – Relação grau de perda registado por tipo de estrada na bacia do RGP e profundidade da superfície de rotura (m). A – Todas as estradas; B –V1 – estradas rurais; C – V1a - caminhos; D - V2 – estradas municipal ou asphaltada; E - V3 – estrada nacional; F - V4 – autoestrada.....	97
Figura 5.18 – Relação grau de perda – intensidade no caso dos edifícios.....	98
Figura 5.19 – Curvas de fragilidade; A – Todas as estradas; B – Tipologia V1 – estradas rurais; C – Tipologia V1a - caminhos; D - Tipologia V2 – estradas municipal ou asphaltada; E – Tipologia V3 – estrada nacional; F - Tipologia V4 - autoestrada.....	99
Figura 5.20 – Curva de fragilidade para os edifícios.....	100
Figura 5.21 – Mapas de suscetibilidade a deslizamentos para a bacia do RGP. R_T – Deslizamentos rotacionais e translacionais; RS – Deslizamentos rotacionais superficiais; RSA – Deslizamentos rotacionais superficiais em talude; TS – Deslizamentos translacionais superficiais e TSA – Deslizamentos translacionais superficiais em talude.....	103
Figura 5.22 - Mapas de suscetibilidade a deslizamentos para a bacia do RGP. RS_RSA – Deslizamentos rotacionais superficiais e rotacionais superficiais em talude; RS_RSA_TS_TSA – Deslizamentos rotacionais e translacionais superficiais e deslizamentos rotacionais e translacionais superficiais em talude; RS_TS – Deslizamentos rotacionais e translacionais superficiais; TS_TSA – Deslizamentos translacionais superficiais e translacionais superficiais em talude; TSA_RSA – Deslizamentos translacionais e rotacionais superficiais em talude.....	104
Figura 5.23 – Curva de sucesso por tipologia de modelo de suscetibilidade	105
Figura 5.24 – Área classificada com suscetibilidade muito elevada e elevada a deslizamentos profundos (Modelo R_T).....	110

Figura 5.25 – Área classificada com suscetibilidade muito elevada e elevada a deslizamentos superficiais (Modelos RS, TS, RSA, TSA).....	110
Figura 5.26 – Suscetibilidade elevada a muito elevada a deslizamentos profundos e distribuição dos diferentes tipos de estrada na área de estudo.....	111
Figura 5.27 - Suscetibilidade elevada a muito elevada a deslizamentos superficiais e distribuição dos diferentes tipos de estrada na área de estudo.....	112
Figura 5.28 – Exposição potencial de edifícios de betão armado por subsecção estatística. Figura da esquerda para o cenário deslizamentos profundos e à direita para deslizamento superficiais.....	115
Figura 5.29 - Suscetibilidade a movimentos de vertente profundos e os elementos expostos: edifícios classificados como elementos vitais estratégicos e/ou sensíveis.....	119
Figura 5.29 - Suscetibilidade a movimentos de vertente superficiais e os elementos expostos: edifícios classificados como elementos vitais estratégicos e/ou sensíveis.....	119

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Correspondência entre formações geológicas e unidades litológicas (UL) na bacia do Rio Grande da Pipa (adaptado de Oliveira, 2012).....	21
Tabela 3.1 - Fontes cartográficas - Formato e estrutura dos dados de base.....	25
Tabela 3.2 - Tipologia e frequência de movimentos de vertente na bacia do Rio Grande da Pipa. Adaptado de Oliveira <i>et al.</i> (2015).....	27
Tabela 3.3 - Tipologia e frequência de movimentos de vertente que causaram danos em estradas e edifícios na bacia do Rio Grande da Pipa. Adaptado de Oliveira (2012).....	29
Tabela 3.4 - Distribuição de troços de estradas e edifícios, por tipologia de construção, afetados por movimentos de vertente na bacia do RGP.....	43
Tabela 4.1 - Abordagem GrauPerda1 - Grau de perda, nível e tipologia de danos em edifícios e estradas (adaptado de Oliveira <i>et al.</i> , 2016).....	48
Tabela 4.2 - Estrutura geral do pavimento rodoviário por tipo de estrada. Adaptado do Instituto de Infraestruturas Rodoviárias (Fonte: Estradas de Portugal, 2009 – Pavimentação).....	54
Tabela 4.3 – Abordagem GrauPerda2 - Nível de danos, grau de perda e tipologia de danos em estradas (adaptado de Alexander, 1989; Garcia, 2012; Oliveira <i>et al.</i> , 2016).....	60
Tabela 4.4 - Grau de perda determinado a partir do nível de danos e perda de funcionalidade.....	66
Tabela 4.5 - Nível de danos, grau de perda e tipologia de danos em edifícios - abordagem GrauPerda 2 (adaptado de Alexander, 1989; Garcia, 2012; Oliveira <i>et al.</i> , 2016).....	67
Tabela 4.6 - Modelos de suscetibilidade a deslizamentos considerados para a bacia do Rio Grande da Pipa.....	75
Tabela 5.1 - Relação área / volume dos deslizamentos com 100, 1.000, 10.000 e 100.000 m ²	86
Tabela 5.2 - Relação profundidade / volume dos deslizamentos para deslizamentos com 100, 1.000, 10.000, 100.000 e 1.000.000 m ³	87

Tabela 5.3 - Relação profundidade / área da superfície de rotura para deslizamentos na bacia do RGP com 100, 1.000, 10.000 e 100.000 m ²	87
Tabela 5.4 - Relação entre área / volume para deslizamentos na bacia do RGP com áreas de 100, 1.000, 10.000 e 100.000 m ²	92
Tabela 5.5 - Relação entre profundidade da superfície de rotura e volume para deslizamentos na bacia do RGP com volumes de 50.000, 100.000, 150.000, 200.000 e 250.000 m ³	93
Tabela 5.6. Relação entre área / profundidade da superfície de rotura para deslizamentos na bacia do RGP com profundidade da superfície de rotura de 1, 5, 10 e 15 m.....	93
Tabela 5.7 – Análise estatística de valores de grau de perda em estradas para cada tipologia de estrada.....	101
Tabela 5.8 - Análise estatística de valores de grau de perda em estradas para cada tipologia de estrada.....	102
Tabela 5.9 - Matriz de danos por categoria de via, segundo a profundidade do deslizamento rotacional. (V1 - estrada rural; V2 - estrada regional; V3 - estrada nacional). Extraído de Garcia (2012).....	102
Tabela 5.10 – Área abaixo da curva (AAC) dos modelos de suscetibilidade a deslizamentos.....	106
Tabela 5.11 – <i>Scores</i> de valor informativo por classe de variável utilizada como fator de predisposição a deslizamentos na bacia do RGP.....	106
Tabela 5.12 – Combinações de fatores de predisposição mais favoráveis para a ocorrência de um tipo ou tipos de deslizamentos na bacia do RGP.....	108
Tabela 5.13 – Área de estudo necessária para validar a percentagem de área deslizada definida em cada classe dos modelos de suscetibilidade a deslizamentos.....	109
Tabela 5. 14 – Exposição por tipologia de estrada a deslizamentos superficiais na área do município de Arruda dos Vinhos localizada na bacia do RGP.....	113

Tabela 5.15 - Exposição por tipologia tipos de estrada a deslizamentos profundos na área do município de Arruda dos Vinhos localizada na bacia do RGP.....	113
Tabela 5. 16 - Distribuição dos edifícios com “estrutura de betão armado” e área suscetível a deslizamentos superficiais e a deslizamentos profundos por subseção estatística com mais de 23 edifícios desta tipologia.....	115
Tabela 5.17 - Distribuição dos edifícios com “estrutura de parede de alvenaria com placa” e área suscetível a deslizamentos superficiais e a deslizamentos profundos por subseção estatística com mais de 20 edifícios desta tipologia.....	116
Tabela 5.18 - Distribuição dos edifícios com “estrutura de parede de alvenaria sem placa” e área suscetível a deslizamentos superficiais e a deslizamentos profundos por subseção estatística com mais de 15 edifícios desta tipologia.....	117
Tabela 5.19 - Distribuição dos edifícios com “estrutura de paredes de adobe ou alvenaria de pedra solta” e área suscetível a deslizamentos superficiais e a deslizamentos profundos por subseção estatística com mais de 10 edifícios desta tipologia.....	117
Tabela 5.20 - Distribuição dos edifícios com “outro tipo de estrutura” e área suscetível a deslizamentos superficiais e a deslizamentos profundos por subseção estatística	118
Tabela 5.21 – Número de edifícios classificados como elementos vitais estratégicos e/ou sensíveis expostos a deslizamentos profundos e superficiais.....	120

RESUMO

Esta dissertação tem como principal objetivo explorar a existência de padrões de vulnerabilidade estrutural em estradas e edifícios gerados pelo impacto de movimentos de vertente do tipo deslizamento. Para o efeito é utilizado um inventário de danos em estradas e edifícios com aproximadamente 400 ocorrências registadas na bacia do Rio Grande da Pipa, Arruda dos Vinhos, uma das áreas com elevada predisposição para a ocorrência de movimentos de vertente na região a norte de Lisboa.

Neste sentido são analisados um conjunto de fatores que condicionam o grau de perda do elemento exposto: (i) a resistência estrutural do elemento afetado; (ii) o tipo de movimento de vertente; (iii) a magnitude/intensidade do movimento de vertente; (iv) a espessura do material deslizado ou a profundidade da superfície de rotura como *proxy* da intensidade, ou (v) a forma como a massa instabilizada afeta a infraestrutura.

Numa primeira etapa é definida uma nova abordagem para determinar o grau de perda em estradas e edifícios (abordagem GrauPerda2). O objetivo é tornar menos ambígua a avaliação qualitativa da vulnerabilidade física, pela subjetividade que pode existir na determinação do grau de perda por técnicos com diferentes níveis de especialização. Com esse propósito são definidos um conjunto de critérios mensuráveis e marcadores únicos de deformação que permitam avaliar objetivamente o grau de perda em estradas e edifícios, quando afetadas por movimentos de vertente. A validação da proposta é feita por confronto com o grau de perda determinada pela abordagem mais subjetiva em uso na região norte de Lisboa (abordagem GrauPerda1)

A validação da proposta GrauPerda2 permitiu definir duas *checklists* de indicadores para determinar o grau de perda de estradas e edifícios a movimentos de vertente. A avaliação da incerteza na relação grau de perda registado em estradas e edifícios com diferente intensidade/magnitude dos movimentos de vertente é explorada graficamente e são elaboradas as correspondentes curvas de fragilidade e matrizes de danos. A avaliação da suscetibilidade a diferentes tipos de deslizamentos na bacia do Rio Grande da Pipa é explorada com base em dois cenários de suscetibilidade: a deslizamentos superficiais e profundos. A última etapa consistiu em avaliar a exposição dos diferentes tipos de

estradas e edifícios a áreas classificadas com suscetibilidade elevada e muito elevada e determinar as perdas potenciais.

No caso das estradas verificou-se uma ligeira tendência independentemente do tipo de estrada para um aumento do grau perda em função do aumento da magnitude dos deslizamentos. No caso dos edifícios os resultados são muito menos conclusivos, em virtude de o registo de danos em edifícios ser bastante reduzido, sendo que apenas nos casos dos edifícios com pedra de adobe ou taipa se verifica uma tendência para um aumento do grau de perda com o aumento da magnitude dos deslizamentos.

Palavras-chave: Deslizamentos, vulnerabilidade física, grau de perda, suscetibilidade a deslizamentos e exposição de estradas e edifícios

ABSTRACT

This main objective of this work is exploring the existence of structural vulnerability patterns in roads and buildings generated by the impact of landslides. For this purpose, an inventory of road and building damages by landslides with approximately 400 occurrences registered in the Rio Grande do Pipa basin, Arruda dos Vinhos, is used. This study area has a high favourability for the occurrence of landslides within the north of Lisbon regional instability context. To achieve this propose, a set of factors are used to determine the degree of loss in the exposed elements: (i) the structural resistance of the affected elements; (ii) the type of landslide; (iii) the magnitude / intensity of landslides; (iv) the landslide thickness or the depth of the landslide rupture surface as a proxy of landslide intensity, or (v) the way the unstable mass affects the infrastructure (different landslide sectors, e.g., scarp, depletion area, accumulation area, toe).

Firstly, a new approach is defined to determine the degree of loss caused by landslides in roads and buildings (GrauPerda2 approach). The objective is to provide a less ambiguous qualitative evaluation of the physical vulnerability, in particular by the subjectivity that can exist in determining the degree of loss by technicians with different levels of specialization. With this purpose, a set of measurable criteria and unique deformation markers are defined, allowing an objectively assessment of the degree of loss in roads and buildings when affected by landslides. The validation of this new proposal is made by comparison with the degree of loss determined by the most subjective approach in use in the northern region of Lisbon (GrauPerda1 approach).

The validation of the GrauPerda2 proposal allowed the definition of two checklists of indicators to determine the degree of loss of roads and buildings to landslides. The evaluation of the uncertainty in the degree of loss recorded in roads and buildings affected by landslides with different intensity / magnitude is explored graphically and the corresponding fragility curves and damage matrices are elaborated.

The assessment of landslide susceptibility to different landslide types in the Rio Grande do Pipa basin is explored based on two scenarios of susceptibility: susceptibility to shallow landslides and to deep-seated landslides. The last step was assessing the exposure of the different types of roads and buildings to areas classified with high or very high landslide susceptibility and determining potential losses.

In the case of roads, independent of the type of road, it is possible to verify a slight increase in the degree of loss in response to an increase in the magnitude of the landslides. In the case of buildings, the results are less conclusive, since the register of damages in buildings is very small. The tendency to increase the degree of loss with the increase in the magnitude of landslides was only observed in the case of adobe or mudstone buildings.

Keywords: *Landslides, physical vulnerability, degree of loss, landslide susceptibility and roads and buildings exposure to landslides*

ABREVIATURAS

AAC - Área Abaixo da Curva

BGRI - Base Geográfica de Referenciação de Informação

CAOP – Carta Administrativa Oficial de Portugal

DGADR - Direção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural

DGT - Direção Geral do Território

EEEVS - Elementos Expostos Estratégicos, Vitais e/ou Sensíveis

INE – Instituto Nacional de Estatística

IWI – Inverso do *Wetness Index*

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MNE – Modelo Numérico de Elevação

R_T – Movimentos de vertente rotacionais e translacionais

RGP – Rio Grande da Pipa

RS - Movimentos de vertente rotacionais superficiais

RSA - Movimentos de vertente rotacionais superficiais antrópicos

RS_RSA – Movimentos de vertente rotacionais superficiais e rotacionais superficiais antrópicos

RS_RSA_TS_TSA – Movimentos de vertente rotacionais superficiais, rotacionais superficiais antrópicos, translacionais superficiais e translacionais superficiais antrópicos

RS_TS - Movimentos de vertente rotacionais superficiais e translacionais superficiais

SOAR – *Slope Over Area Ratio*

TS - Movimentos de vertente translacionais superficiais

TSA - Movimentos de vertente translacionais superficiais antrópicos

TSA_RSA - Movimentos de vertente translacionais superficiais antrópicos e rotacionais superficiais antrópicos

TS_TSA - Movimentos de vertente translacionais superficiais e translacionais superficiais antrópicos

UL – Unidade Litológica

VI – Valor Informativo

A dificuldade em determinar quantitativamente o grau de perda (vulnerabilidade física) de um elemento exposto em função do impacto exercido por um movimento de vertente de determinada magnitude/intensidade está na origem desta dissertação. Esta dificuldade assenta essencialmente na complexidade em definir o grau de afetação estrutural ou o grau de perda de funcionalidade sofrido pelo elemento exposto. Como forma de ultrapassar esta incerteza, têm sido adotadas abordagens mais expeditas, quer de natureza mais quantitativa, por exemplo, com base na determinação do grau de perda pela relação entre o custo de construção e de reconstrução do elemento afetado (*e.g.*, Papathoma-Köhle *et al.*, 2012), quer de natureza mais qualitativa (neste trabalho designadas por GrauPerda1), suportadas por relações empíricas que estabelecem a relação entre nível de danos/grau de perda de um elemento exposto e diferentes tipologias de danos (*e.g.*, Guillard-Gonçalves *et al.*, 2016).

Neste contexto, o principal objetivo desta dissertação, envolve a determinação de padrões de vulnerabilidade estrutural de estradas e edifícios em função de um conjunto de fatores que condicionam o grau de perda do elemento exposto, de que são exemplo: (i) a resistência estrutural do elemento afetado; (ii) o tipo de movimento de vertente; (iii) a magnitude/intensidade do movimento de vertente; (iv) a espessura do material deslizado ou a profundidade da superfície de rotura como *proxy* da intensidade, ou (v) a forma como a massa instabilizada afeta a infraestrutura.

Para o efeito, propõe-se avaliar as seguintes hipóteses de investigação:

H1 - A utilização de tipologias de danos sustentadas num conjunto de critérios mensuráveis e marcadores únicos de deformação, permite determinar objetivamente o grau de perda em estradas e edifícios afetadas/os por movimentos de vertente com um razoável ajuste às relações empíricas em uso regionalmente.

H2 – A existência de um inventário de movimentos de vertente que geraram danos em estradas e edifícios na bacia do Rio Grande da Pipa, permite determinar padrões de deformação estrutural através das relações entre a intensidade/magnitude dos movimentos de vertente, a resistência estrutural de estradas e edifícios e o grau de perda desses elementos expostos

Neste sentido, de forma a tornar menos ambígua a avaliação qualitativa da vulnerabilidade física, pela subjetividade que pode existir na determinação do grau de perda por técnicos com diferentes níveis de especialização, pretende-se ainda:

- (i) Definir um conjunto de critérios mensuráveis e marcadores únicos de deformação que permitam avaliar objetivamente o grau de perda em estradas e edifícios, quando afetadas por movimentos de vertente (abordagem GrauPerda2);
- (ii) Comparar e validar a avaliação qualitativa da vulnerabilidade física das estradas e edifícios a movimentos de vertente com base na abordagem mais subjetiva e mais utilizada na região norte de Lisboa (GrauPerda1) e na abordagem mais objetiva, definida em (i) como abordagem GrauPerda2;
- (iii) Definir *checklists* de indicadores que permitam determinar o grau de perda de estradas e edifícios a movimentos de vertente;
- (iv) Avaliar a incerteza na relação grau de perda registado e intensidade/magnitude dos movimentos de vertente;
- (v) Elaborar curvas de fragilidade e matrizes de danos para estradas e edifícios em função da intensidade/magnitude dos movimentos de vertente;
- (vi) Avaliar a exposição e perda potencial de diferentes tipos de estradas e edifícios à ocorrência de movimentos de vertente tendo por base mapas de suscetibilidade a deslizamentos superficiais e de suscetibilidade a deslizamentos profundos.

Para responder a estes objetivos, esta dissertação foi estruturada em 5 capítulos, iniciado com o estado de arte (Capítulo 1), caracterização da área de estudo (Capítulo 2), caracterização da informação cartográfica e dados de base (Capítulo 3), metodologia (Capítulo 4) e resultados (Capítulos 5).

No capítulo 1 são apresentados os principais conceitos a utilizar nesta dissertação, quer relativos ao tipo de movimentos de vertente que tem gerado danos na área de estudo, quer relativos à vulnerabilidade, vulnerabilidade física dos elementos expostos e exposição a movimentos de vertente. São ainda apresentadas de forma sumária as principais estratégias utilizadas globalmente para avaliar a vulnerabilidade física.

No capítulo 2 é feita a caracterização da área de estudo, a Bacia do Rio Grande da Pipa, é efetuado o seu enquadramento geográfico, a caracterização das principais unidades

litológicas que afloram na bacia e uma sucinta caracterização geomorfológica e associado contexto de ocorrência de instabilidade de vertentes.

No capítulo 3 é dedicado à caracterização da informação cartográfica e dados de base. São apresentados os diferentes tipos de informação cartográfica utilizadas na dissertação, tal como o inventário de movimentos de vertente que geraram danos em estradas e edifícios, os fatores de predisposição utilizados na avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente, e a caracterização dos diferentes tipos e distribuição de estradas e de edifícios.

No capítulo 4 (metodologia) são apresentadas duas abordagens para quantificar o grau de perda (nível de danos) em função de diferentes tipologias de danos em estradas e estradas. Na metodologia é feita uma nova proposta GrauPerda2 cujos critérios para determinar o grau de perda são mais objetivos, mensuráveis ou correspondem a marcadores únicos de deformação. É efetuada uma extensa descrição dos critérios que sustentam a proposta GrauPerda2 e são apresentadas *checklists* para a determinação do grau de perda diretamente no campo.

No capítulo 5 são apresentados os resultados relativos à determinação dos padrões regionais de vulnerabilidade estrutural de estradas e edifícios em função da intensidade /magnitude dos movimentos de vertente é avaliada a incerteza na relação entre grau de perda e magnitude/intensidade dos deslizamentos. Numa etapa subsequente é avaliada a suscetibilidade a deslizamentos superficiais e profundos e determinada a respetiva exposição de estradas e edifícios e a exposição potencial dos diferentes tipos de edifícios com base nos dados dos CENSOS 2011. Por fim, são apresentadas as conclusões da dissertação.

Propositadamente deixado em branco

CAPÍTULO 1. MOVIMENTOS DE VERTENTE, ELEMENTOS EXPOSTOS E AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE FÍSICA

1.1. MOVIMENTOS DE VERTENTE

O movimento de vertente (“*landslide*”) é um movimento descendente de rocha, detritos ou solo em que o centro de gravidade do material afetado progride para jusante e para o exterior (Cruden e Varnes, 1996). Segundo Cruden e Varnes (1996) os movimentos de vertente podem ser classificados como: desabamento, tombamento (balançamento), deslizamento, expansão lateral e escoada. Tendo por base o inventário de movimentos de vertente elaborado por Oliveira (2012) para a bacia do Rio Grande da Pipa, os movimentos de vertente que têm originado danos em elementos expostos são essencialmente do tipo escoada e deslizamento, os últimos tanto com superfície de rotura planar (deslizamento translacional) como com superfície de rotura curva (deslizamento rotacional) (Figura 1.1).

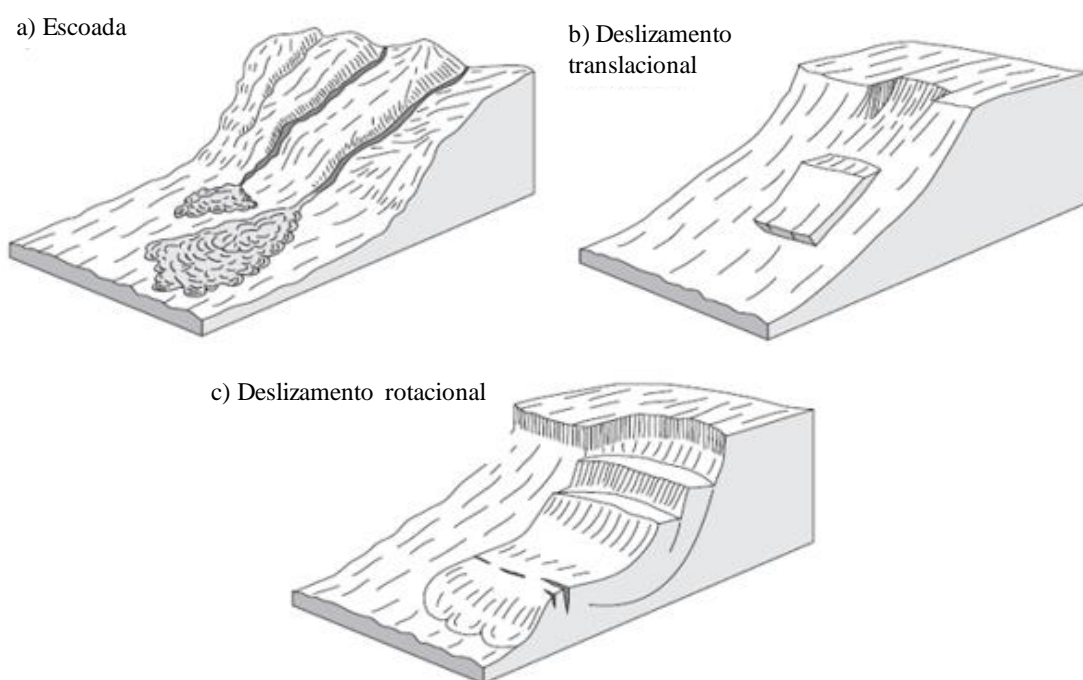


Figura 1.1 - Tipos de movimentos de vertente que tem originado mais danos em elementos expostos na região de Arruda dos Vinhos. Adaptado de Hugget (2007).

A escoada corresponde a um movimento de vertente espacialmente contínuo caracterizado por superfícies de tensão tangencial efémeras, estreitas e frequentemente não preservadas. No interior da massa deslocada a distribuição das velocidades assemelha-se à de um fluído viscoso (WP/WLI, 1993; Cruden e Varnes, 1996). Em muitas situações as escoadas têm início num deslizamento (*e.g.*, Iverson *et al.*, 1997) e a transição de um deslizamento para escoada (grande deformação interna dos materiais e velocidade de deslocamento elevadas) depende em muitos casos do teor de água no solo que promove a perda de coesão dos materiais, da mobilidade sobretudo na presença de vertentes muito inclinadas e da própria evolução do movimento de vertente (Cruden e Varnes, 1996).

O deslizamento corresponde a um “movimento de solo ou rocha que ocorre predominantemente ao longo de planos de rotura ou de zonas relativamente estreitas, sujeitas a intensa deformação tangencial” (WL/WLI, 1993; Cruden e Varnes, 1996). Dois tipos de deslizamento podem ser identificados em função da geometria da superfície de rotura:

- (i) Deslizamento translacional, está associado a uma superfície de rotura planar ou muito pouco ondulada. O seu deslocamento vai geralmente para além da superfície de rotura, cobrindo a jusante a superfície topográfica original (Cruden e Varnes, 1996).
- (ii) Deslizamento rotacional ocorre ao longo de um plano de rotura curvo e côncavo (Varnes, 1978). A cabeça do movimento pode registar descidas verticais abruptas e a parte superior da massa deslocada tende a inclinar para montante (Cruden e Varnes, 1996), formando aclives que promovem a retenção da água no interior da massa instabilizada, favorecendo o prolongamento no tempo das manifestações de instabilidade.

1.2. ELEMENTOS EXPOSTOS

A determinação da vulnerabilidade de um qualquer elemento ou conjunto de elementos expostos à ocorrência de movimentos de vertente (elementos em risco) constitui uma etapa essencial no quadro da avaliação do risco (*e.g.*, Léone *et al.*, 1996, Kang e Kim, 2016). Os elementos expostos, neste contexto, servem de base à estimativa dos graus de perda expectáveis (vulnerabilidade), salientando Garcia (2012) que: i) um elemento não é vulnerável se não for afetado por nenhum perigo; ii) um perigo só causa risco se afetar um elemento; iii) o risco depende do grau de exposição do elemento; e iv) o risco depende do nível de conhecimento.

Os elementos expostos têm sido agrupados genericamente em três conjuntos (Figura 1.2; Léone, 1996; Crozier e Glade, 2005; Garcia, 2012; Puissant *et al.*, 2013):

- i) Bens e propriedades (*e.g.*, edifícios, casas, veículos);
- ii) Serviços/funções (*e.g.*, abastecimento água, transporte, comunicações);
- iii) Pessoas (que vivem, trabalham ou passeiam na área exposta).

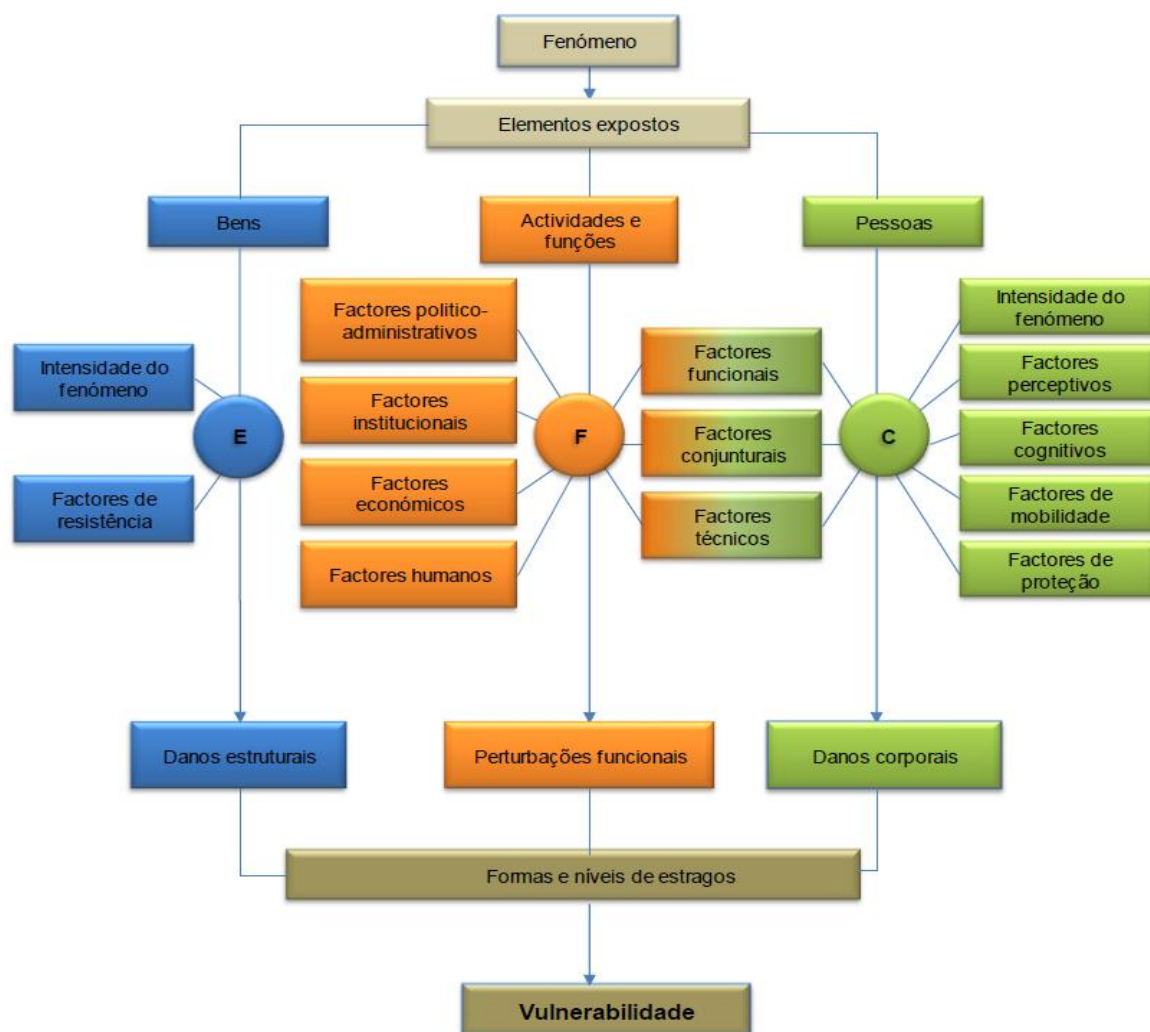


Figura 1.2 - Componentes e fatores condicionantes da vulnerabilidade (adaptado de Léone, 1996, Fonte: Garcia, 2012).

i) Bens e propriedades

A avaliação da vulnerabilidade tem-se focado essencialmente na avaliação dos danos estruturais, isto é, a vulnerabilidade depende fundamentalmente da relação entre a resistência estrutural do elemento e da intensidade do fenómeno (*e.g.*, Garcia, 2012). Os elementos expostos mais utilizados na avaliação da vulnerabilidade física são os edifícios (*e.g.*, Bell e Glade, 2004; Fuchs *et al.*, 2007; Uzielli *et al.*, 2008; Zêzere *et al.*, 2008; Kappes *et al.*, 2012; Fuchs *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2016; Ettinger *et al.*, 2016; Ciurean *et al.*, 2017; Pereira *et al.*, 2017; Soldato *et al.*, 2017; Peduto *et al.*, 2017) e as estradas (*e.g.*, Zêzere *et al.*, 2007; Winter *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2016).

A interação entre movimentos de vertente e áreas urbanas e infraestruturas tem ganho relevância nas últimas décadas com custos/impactos muito significativos, quer do ponto de vista físico, quer do ponto de vista social e económico (Antronico *et al.*, 2015). O impacto socioeconómico provocado pelos movimentos de vertente tem sido agravado atendendo ao grau de dispersão/difusão de centros urbanos/edificado disperso e rede de transportes para áreas suscetíveis a movimentos de vertente (Schuster e Highland, 2007).

ii) Serviços/Funções

A vulnerabilidade associada a este tipo de elementos expostos está relacionada com o conjunto de fatores intrínsecos à própria sociedade, pois estes influenciam o modo como a comunidade afetada reage e encontra soluções para o restabelecimento das atividades e funções (*e.g.*, fatores políticos, económicos, institucionais, conjunturais), estes podem ser condicionados por danos estruturais do local onde se encontram ou por danos corporais se tivermos em consideração as pessoas que asseguram o serviço/ função (Léone 1996; Garcia, 2002).

iii) Pessoas

A vulnerabilidade neste caso é determinada pelos danos corporais nas pessoas que por exemplo vivem, trabalham ou circulam numa determinada área potencialmente perigosa, sendo estas: homens, mulheres, crianças, minorias, idosos, pessoas com debilidade, etc. (Michael-Leiba *et al.*, 2000; Cardinali *et al.*, 2002; Bell e Glade, 2004).

Os danos corporais (vulnerabilidade) dependem sobretudo de fatores intrínsecos ao indivíduo ou comunidade, por exemplo: a perceção da sua exposição, o conhecimento das medidas a tomar, mobilidade, idade, género, emprego, saúde, nível de educação e condições económicas,

etc... É de salientar que as pessoas mais idosas ou com saúde debilitada constituem um elemento exposto com maior vulnerabilidade (Tapsell *et al.*, 2002).

Com efeito, existem muitos fatores que condicionam o tipo de danos que os elementos expostos podem sofrer no território (Léone, 1996) (Figura 1.2) pelo que a diminuição da exposição e mitigação de possíveis consequências associadas aos movimentos de vertente deve ter por base um eficaz ordenamento do território (Fell *et al.*, 2008), para tal é fundamental estabelecer, no caso dos movimentos de vertente, a relação entre o risco potencial e os elementos expostos e vitais (Jaedicke *et al.*, 2014).

Relativamente aos elementos vitais, Julião *et al.* (2009) classificam-nos de importância Estratégica, Vital e/ou Sensível (EEEVS) e por isso, fundamentais para a resposta à emergência (*e.g.*, rede hospitalar e de saúde, rede escolar, quartéis de bombeiros e instalações de outros agentes de proteção civil e autoridades civis e militares) e de suporte básico às populações (*e.g.*, origens e redes principais de abastecimento de água, rede elétrica, centrais e retransmissores de telecomunicações).

1.3. VULNERABILIDADE E VULNERABILIDADE FÍSICA

O termo vulnerabilidade tem apresentado definições variadas dependendo do contexto das diversas disciplinas onde é utilizado (ecologia, política, humana, ciência física, estrutural e a análise espacial) (Cutter, 1996; Birkmann, 2006; Fuchs, 2009; Godfrey *et al.*, 2015), ainda assim as diferentes definições convergem em alguns pontos comuns:

- Probabilidade temporal e espacial de ocorrência do fenómeno potencialmente perigoso;
- Exposição ao fenómeno potencialmente perigoso;
- Vulnerabilidade dos diferentes elementos expostos.

Neste sentido, diferentes dimensões podem ser consideradas no estudo da vulnerabilidade (Etkin e Stefanovic, 2005; Birkmann e Wisner, 2006; Papathoma-Köhle *et al.*, 2011; Sterlacchini *et al.*, 2014):

i) Económica - relacionada com a estabilidade de uma região devido à produção, distribuição e consumo de bens, como também à situação económica dos indivíduos, comunidades e nações;

ii) Ambiental – relacionado com os ecossistemas/ ambiente, o modo como este poderá recuperar dos diferente fenómenos naturais dependendo do tempo e do espaço;

iii) Social - relacionado com a exposição humana (individual, da comunidade) - influenciada pelas características de uma pessoa ou de um grupo, bem como pela própria situação em que encontram e que influência a sua capacidade para antecipar, enfrentar, resistir e recuperar a partir do impacto de um fenómeno potencialmente perigoso. Esta envolve a combinação de fatores que determinam em que medida a vida de alguém, as propriedades e outros bens que são colocados em risco por um evento isolado e identificável (Wisner *et al.*, 2004).

iv) Física – relacionado com a predisposição da estrutura, infraestrutura ou serviço para sofrer danos.

A vulnerabilidade é muitas vezes difícil de avaliar devido à/ao (Glade, 2003; Douglas, 2007; Sterlacchini *et al.*, 2014):

- Falta de registos relativos aos impactos de eventos potencialmente perigosos ocorridos no passado e respetivos danos em elementos expostos;
- Dificuldade na recolha de dados relacionados com as características inerentes aos elementos em risco e da sua exposição espacial e temporal;
- Facto de fenómenos similares poderem determinar graus de vulnerabilidade diferentes em elementos expostos diferentes;
- Complexidade dos fenómenos e dos diferentes cenários em relação ao sistema em estudo (efeitos conjuntos e em cascata);
- Parametrização, medição e determinação da escala da magnitude/intensidade dos movimentos de vertente (Guzzetti, 2005).

Em termos físicos, a vulnerabilidade refere-se ao grau de perda de um elemento ou conjunto de elementos em risco resultante da ocorrência de um fenómeno natural potencialmente destruidor, de determinada magnitude, e é expressa numa escala que varia entre 0 (não há perda) a 1 (perda total do elemento) (UNDRO, 1984; Varnes, 1984; Léone *et al.*, 1996; Glade, 2003; Fell *et al.*, 2005) ou em alternativa pela percentagem do valor da reconstrução do elemento afetado (Buckle *et al.*, 2000).

A vulnerabilidade física de um elemento exposto pode ainda ser determinada com recurso a funções que apresentam diferentes graus de complexidade como por exemplo a função apresentado por (Uzielli *et al.*, 2008):

$$V = I * S \quad (\text{Eq. 1.1})$$

Onde: V corresponde à vulnerabilidade; I corresponde à intensidade do fenómeno (*e.g.* movimento de vertente) e S corresponde à resistência dos elementos expostos.

No exemplo, a vulnerabilidade é avaliada tendo em consideração a magnitude do movimento de vertente (volume e velocidade) e a resistência do elemento exposto. No caso dos edifícios a determinação da suscetibilidade inclui avaliar por exemplo: o tipo de estrutura morfológica; o estado de manutenção do edifício ou; a sua relevância estratégica.

No caso da avaliação da vulnerabilidade física de estradas e edifícios, assumida neste trabalho como diretamente relacionada com a vulnerabilidade estrutural (*e.g.*, Dall’Osso *et al.*, 2009), é referenciado que (Hungre e Evans, 1997; Alexander, 2004; Lateltin *et al.*, 2005; Papathoma-Köhle *et al.*, 2011; Ciurean *et al.*, 2013; Uzielli *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2016):

- (i) o nível de danos está dependente da tipologia e magnitude do movimento de vertente;
- (ii) o nível de danos estruturais ou não-estruturais está amplamente dependente da resistência do elemento afetado;
- (iii) a posição do elemento afetado dentro da massa deslizada condiciona o potencial de vulnerabilidade;
- (iv) o nível de danos pode ser referenciado de forma qualitativa ou quantitativa para a determinação de padrões de deformação.

A forma como os movimentos de vertente podem afetar os elementos expostos é muitas vezes complexa (*e.g.*, Oliveira *et al.*, 2016) e mesmo atendendo ao condicionalismo exercido pela resistência estrutural do elemento afetado, o grau de perda não é completamente independente da posição da estrutura/infraestrutura relativamente ao movimento de vertente (Glade *et al.*, 2005; van Western *et al.*, 2006; Léone, 2007). No caso de estradas e edifícios várias estratégias têm sido adotadas em função do impacto de diferentes tipos de movimentos

de vertente ou do impacto provocado pelos diferentes setores dos movimentos de vertente (Léone, 1996; Glade *et al.*, 2005; Garcia, 2012; Oliveira *et al.*, 2016).

Na Figura 1.3 é ilustrada a tipologia de relações entre os diferentes setores dos movimentos de vertente (pé, cicatriz, topo) e a posição dos elementos expostos nesses diferentes setores, no caso em concreto para movimentos de vertente do tipo deslizamento.

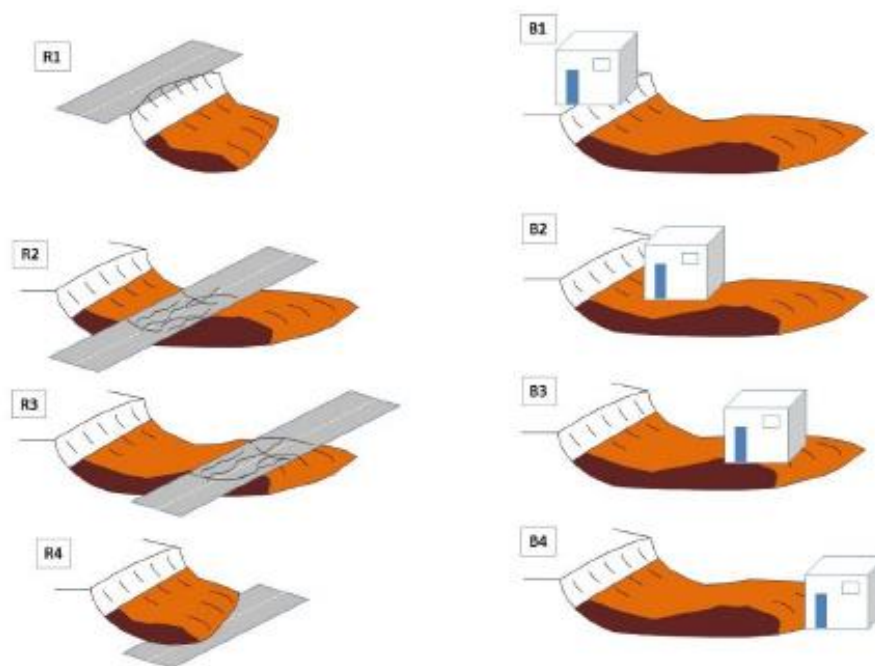


Figura 1.3 - Tipologia de relações entre os diferentes setores dos movimentos de vertente (pé, cicatriz, topo) e a posição dos elementos expostos nesses diferentes setores, no caso em concreto para movimentos de vertente do tipo deslizamento. Adaptada de Oliveira *et al.* (2016).

A complexidade na quantificação do valor da vulnerabilidade depende muito das características do elemento exposto, do tipo de movimento e das solicitações mecânicas que o afetam (Glade, 2003; Uzielli *et al.*, 2008; Silva e Pereira, 2014). A vulnerabilidade dos elementos expostos (*e.g.*, os edifícios, vias de comunicação) para além da influencia da intensidade (ou magnitude) do movimento de vertente é ainda influenciada no que diz respeito aos movimentos de vertente (Léone, 1996; Léone *et al.*, 1996; Flageollet, 1999; Lateltin *et al.*, 2005; Papathoma-Köhle *et al.*, 2007):

- Pela dimensão ou outros aspetos geométricos (forma, área, espessura, volume);
- Por fatores cinéticos (velocidade, aceleração do fluxo);
- Por outros fatores (densidade da massa deslizada, viscosidade).

1.4. ESTRATÉGIAS UTILIZADAS NA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE FÍSICA

Na avaliação da vulnerabilidade física as consequências potenciais ou induzidas nos elementos expostos são geralmente medidas em termos de perdas e danos, numa escala qualitativa, semi-quantitativa ou quantitativa baseada em percepções ou avaliações mais ou menos complexas (Glade *et al.*, 2005).

Várias abordagens têm sido utilizadas para expressar a vulnerabilidade física (Papathoma-Köhle, 2016, Papathoma-Köhle *et al.*, 2017): (i) matrizes de vulnerabilidade; (ii) índices de vulnerabilidade; (iii) curvas de fragilidade; (iv) curvas de vulnerabilidade. A utilização de mais do que uma abordagem para determinar a vulnerabilidade física tem sido considerada uma mais valia, uma vez que para as diferentes entidades envolvidas, por exemplo na gestão de um desastre, pode propiciar uma representação quantitativa da vulnerabilidade física potencial baseada em dados empíricos (curvas), bem como propiciar valores de vulnerabilidade de elementos individuais ligados às suas características (hierarquizar, por exemplo a resistência estrutural dos elementos expostos), podendo com essa informação dar prioridade à ativação de recursos e pequenas intervenções locais como forma de redução da vulnerabilidade das pessoas que utilizam essas áreas expostas (Papathoma-Köhle, 2016).

Dada a dificuldade em obter dados relativos às consequências, tipicamente, na avaliação da vulnerabilidade física com base nas diferentes metodologias são utilizadas pequenas áreas de estudo, com reduzido número de elementos expostos (*e.g.*, Uzielli *et al.*, 2014).

A utilização de abordagens mais qualitativas ou quantitativas para avaliar a vulnerabilidade física tem sido sustentadas nos seguintes pressupostos:

- qualitativa/heurística - as diferenças entre os danos causados nos elementos expostos são geralmente definidas através de escalas hierárquicas de danos estabelecendo diferenças entre os danos causados nos elementos expostos, por exemplo: estéticos, funcionais e estruturais (*e.g.*, Cardinali *et al.*, 2002; Reichenbach *et al.*, 2005; Sterlacchini *et al.*, 2007);
- semi-quantitativa - implica a expressão de um valor de vulnerabilidade, geralmente com suporte em interpretações empíricas (Dai *et al.*, 2002) ou parâmetros ou limiares obtidos empiricamente (Dai *et al.*, 2002; Uzieli *et al.*, 2008);

- quantitativa - é baseada em dados históricos de eventos com danos (Sterlacchini *et al.*, 2014). A estimativa da vulnerabilidade pode ser obtida através da fração do valor dos danos face ao valor total (Bonachea *et al.*, 2004).

As curvas de vulnerabilidade permitem quantificar o grau de perda através de uma função paramétrica e permitem uma eventual aplicação da relação intensidade-danos (espaço, tempo) com base num conjunto de registos de consequências para áreas mais alargadas (*e.g.*, Fuchs *et al.*, 2007; Papathoma-Köhle *et al.*, 2007, 2012, 2016; Sterlacchini *et al.*, 2007; Totschnig *et al.*, 2012). É de realçar que quantos mais dados de avaliação houver mais consistente será a curva (Uzielli *et al.*, 2008; Puissant *et al.*, 2013). Os resultados das curvas permitem avaliar de forma quantitativa a vulnerabilidade física (Papathoma-Köhle *et al.*, 2017) e inferir os custos financeiros em diferentes cenários como também a análise custo-benefício para a aplicação de medidas de proteção, redução do risco ou ordenamento do território (Puissant *et al.*, 2013);

As curvas de fragilidade expressam quantitativamente, sob a forma de probabilidade de excedência de um determinado nível de danos o impacto regional dos movimentos de vertente (Blong, 2003) e a nível económico permitem estimar as perdas diretas em termos de custos (HAZUS 2003, 2010). De uma forma geral, expressam a probabilidade de uma infraestrutura vir a sofrer danos físicos ou funcionais em função da intensidade dos processos, isto é, da sua severidade (Corominas *et al.*, 2014; Sterlacchini *et al.*, 2014).

Matrizes de danos expressam um valor de vulnerabilidade de acordo com o nível de estragos expectável e intensidade do fenómeno (*e.g.*, Léone, 1996; Petrucci e Gullà, 2009) e corresponde a uma das abordagens mais utilizadas para expressar a vulnerabilidade física (Kappes *et al.*, 2012) essencialmente de forma qualitativa (Papathoma-Köhle *et al.*, 2017). Ainda assim a sua elaboração pode utilizar uma formulação mais ou menos complexa e contrastada, em que os valores de alguns parâmetros ou limiares usados ou são obtidos empiricamente ou são obtidos de modo pouco explícito, através do conhecimento adquirido regionalmente (*e.g.*, Michael-Leiba *et al.*, 2000; Papathoma-Köhle *et al.*, 2007; Kappes *et al.*, 2012; Guillard-Gonçalves, *et al.*, 2016). A vulnerabilidade de uma infraestrutura é determinada pelo número de atributos como por exemplo o tipo de material de construção, a sua dimensão e as suas condições (idade, número de pisos, estado de conservação, etc.) (Fuchs *et al.*, 2007; Tarbotton, 2015).

Indicadores/ Índices segundo Birkmann, (2006) devem corresponder a variáveis cuja utilização deve permitir representar as características relativas à qualidade do elemento/sistema e capaz de prover informação sobre a sua suscetibilidade. Os indicadores poderão ser ponderados de forma diferenciada de acordo com o objetivo da avaliação da vulnerabilidade e dos usuários finais (Kappes *et al.*, 2012; Papathoma-Khöle, 2016). Normalmente são considerados nas múltiplas características do ser humano (idade, saúde, nível de educação) (Kappes *et al.*, 2012) ou nas múltiplas características de um edifício (idade, número de pisos, estado de conservação) (Papathoma-Köhle *et al.*, 2007).

Propositadamente deixado em branco

CAPÍTULO 2. ÁREA DE ESTUDO – BACIA DO RIO GRANDE DA PIPA

2.1. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

A área de estudo corresponde à bacia do Rio Grande da Pipa (RGP) e está centrada na região de Arruda dos Vinhos, 30 km a norte de Lisboa (Figura 2.1). Os seus limites estendem-se por cerca de 110 km² até ao estrangulamento que a bacia sofre a jusante e a oeste de Quintas/Cadafais (Figura 2.2). A bacia do RGP é delimitada a oeste pela bacia do Rio Sizandro, a este pela planície aluvial do Rio Tejo (do qual o Rio Grande da Pipa é um tributário da margem direita), a norte pela bacia do Rio Alenquer e a sul pela bacia do Rio Trancão. A nível administrativo, a bacia do Rio Grande da Pipa está localizada nas regiões NUTS III do Oeste e da Lezíria do Tejo e distribui-se pelos municípios de Arruda de Vinhos (45,5 %), Alenquer (22,5 %), Sobral de Monte Agraço (18,3 %) e Vila Franca de Xira (13,6 %) (Figura 2.1).

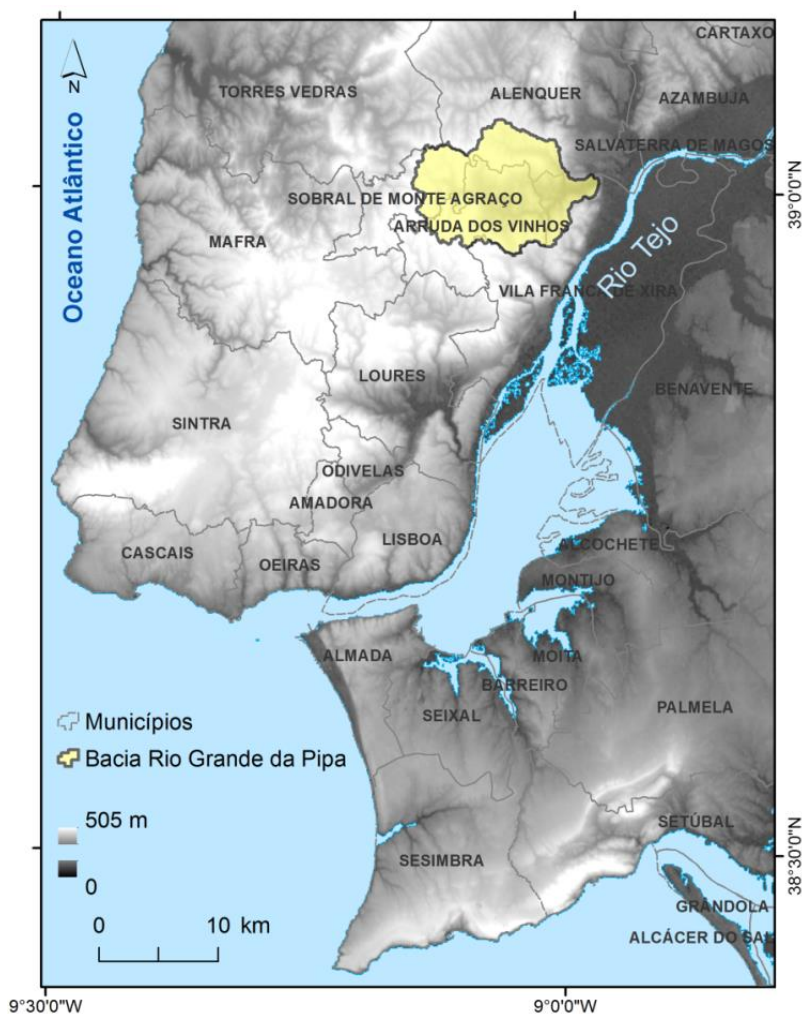


Figura 2.1 - Enquadramento geográfico da bacia do Rio Grande da Pipa (RGP).

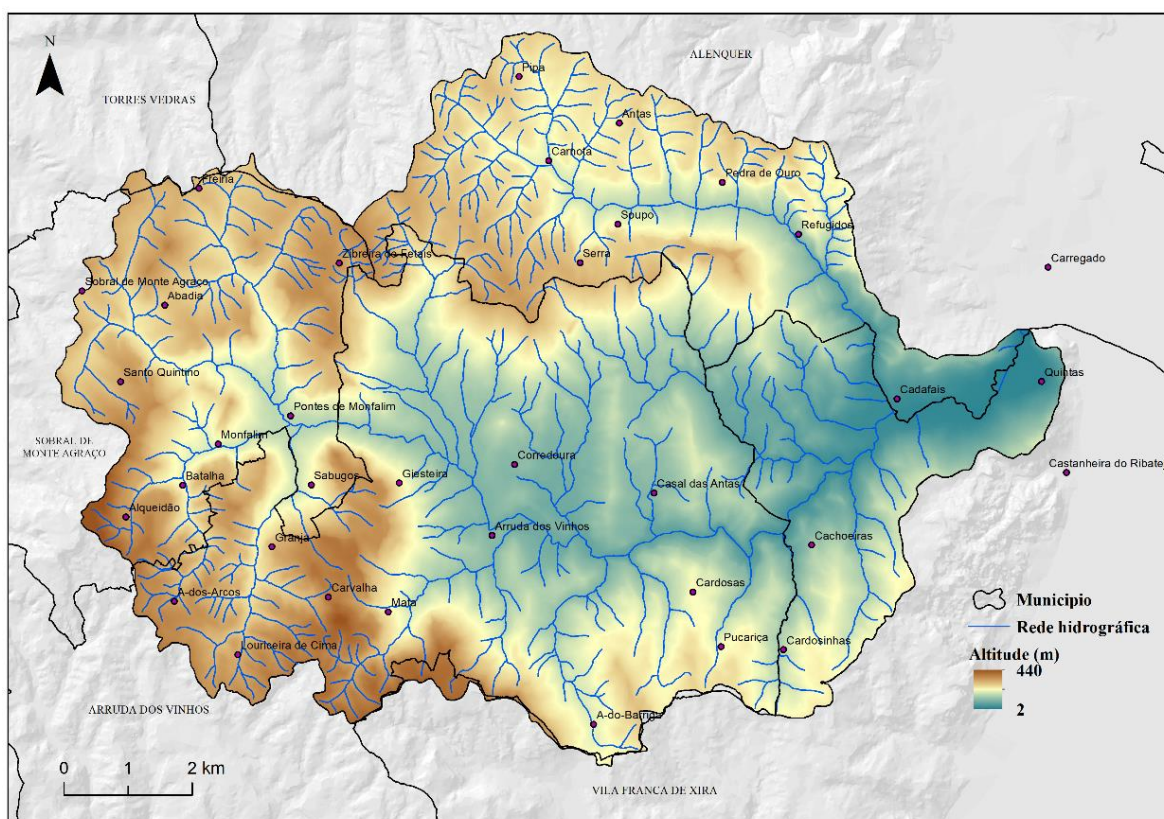


Figura 2.2 - Delimitação da bacia do Rio Grande da Pipa, modelo numérico de elevação (MNE) e rede hidrográfica.

2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

A bacia do Rio Grande da Pipa localiza-se na unidade morfoestrutural da Orla Mesocenozóica Ocidental e caracteriza-se pela predominância de formações sedimentares do Jurássico Superior (Zbyszewski e Assunção, 1965). Na área de estudo foram individualizadas 11 unidades litológicas (Figura 2.3, Tabela 2.1) que no essencial, correspondem às dez formações geológicas sedimentares (UL1 a UL10) identificadas na carta geológica 1:25.000 (LNEG, 2005). Os filões e massas vulcânicas, independentemente do tipo de rocha ou grau de alteração, foram agregados numa única unidade litológica (UL11).

Espacialmente destacam-se, pela área que abrangem na bacia do RGP ($\approx 99\%$), cinco unidades litológicas descritas por ordem decrescente de importância (Figura 2.3, Tabela 2.1): UL9, UL6, UL7, UL5 e UL1. As restantes seis unidades litológicas (UL2, UL3, UL4, UL8, UL0 e UL11) tem uma expressão residual na área de estudo ($< 1\%$) (Figura 2.3, Tabela 2.1).

Neste sentido, seguindo o critério idade, é apresentada apenas a caracterização geral das cinco unidades litológicas com maior relevância espacial na bacia do Rio Grande da Pipa (Figura 2.3, Tabela 2.1):

- UL1 – Corresponde à formação geológica mais recente da área de estudo e é descrita para o prolongamento das aluviões de alguns vales afluentes do baixo Tejo como um complexo fluvio-marinho que pode atingir até cerca de 60 m (*e.g.*, Carregado, Vila Franca de Xira) de lodos, lodos mais ou menos arenosos, areias cinzentas e areias mais ou menos lodosas. Nos restantes vales corresponderá a aluviões argilo-arenosos de reduzida espessura (Zbyszewski e Assunção, 1965).
- UL5 – A formação de Arranhó abrange 5,8 % da área de estudo. Esta UL é constituída principalmente por uma alternância de calcários e margas depositados num ambiente de um golfo pouco profundo de carácter estuarino. Esta unidade é marcada sobretudo pela presença de calcários calciclásticos de fácies marinha e salobra (Kullberg *et al.*, 2006, 2013).
- UL6 - A formação de Sobral abrange 16,1 % da área de estudo, a UL é constituída por uma sequência siliclástica de margas siltosas ou arenosas, argilas siltosas, arenitos mais ou menos grosseiros (podendo ser oolíticos) e raros e finos horizontes de calcários micríticos com percentagens variáveis de calhaus de quartzo (Kullberg *et al.*, 2013).
- UL7 – A formação de Amaral abrange 16 % da área de estudo. A UL é constituída por massas calcárias, ligadas entre si ou separadas por margas ou por margo-calcários sendo o contacto com a parte superior da UL9 muito irregular (Zbyszewski e Assunção, 1965). Pimenta (2011), individualizou na área de estudo um nível inferior de espessura muito irregular e carácter lenticular de calcários margosos recifais, com alguns níveis margosos intercalados; um nível intermédio de margas, com alguns níveis argilosos intercalados e um nível superior, mais espesso, de calcários e calcários margosos recifais.

- UL9 – A formação de Abadia aflora em quase 58 % da área de estudo. A UL consiste num complexo argiloso de argilas e margas cinzentas/azuladas ou amarelas por alteração, podendo ser arenosas e micáceas e conter nódulos calcários ou limoníticos bem como intercalações de grés e de conglomerados de desenvolvimento variado (Zbyszewski e Assunção, 1965).

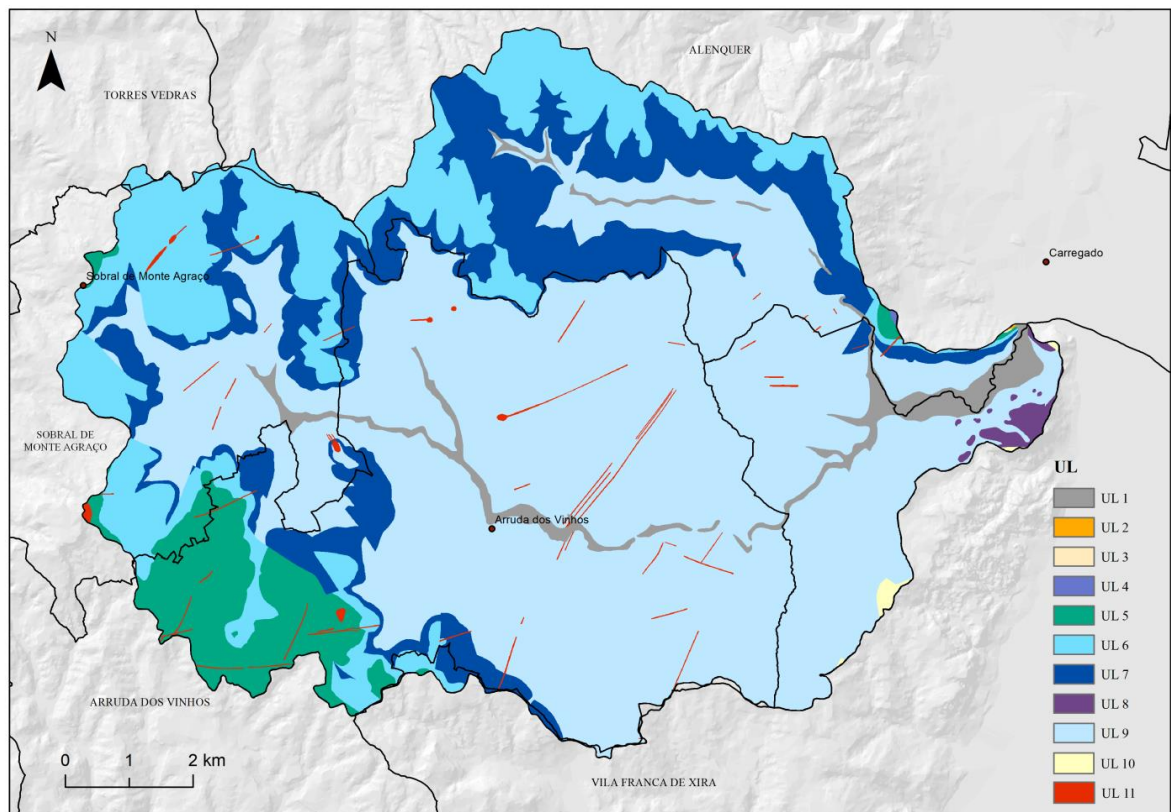


Figura 2.3 - Unidades litológicas da bacia do Rio Grande da Pipa. Adaptado da cartografia 1:50.000 da Folha 30-D (Alenquer) da Carta Geológica de Portugal (Zbyszewski e Assunção, 1965) e das Folhas 389 e 390 da Carta Geológica da Área Metropolitana de Lisboa na escala 1:25.000 (INETI, 2005).

Tabela 2.1 - Correspondência entre formações geológicas e unidades litológicas (UL) na bacia do Rio Grande da Pipa (adaptado de Oliveira, 2012).

ID	Formação Geológica***	Idade	Litologia***	Espessura (m)	Área (m²)†	Área (%)†
UL 1	Aluviões	Holocénico*	Aluviões / aterros	60*	3.460.150	3,1
UL 2	Formação de Benfica	Oligocénico*	Conglomerados, arenitos e argilitos	(?)	3.475	0,003
UL 3	Formação de Benfica	Oligocénico*	Intercalações calcárias	(?)	3.525	0,003
UL 4	Formação de Freixial	Titoniano Médio-Superior**	Arenitos, margas e calcários	150 – 200**	14.800	0,01
UL 5	Formação de Arranhó	Titoniano Inferior**	Calcários e margas	150 – 250**	6.386.125	5,8
UL 6	Formação de Sobral	Kimeridgiano Superior (?) - base do Titoniano (?)**	Pelitos, arenitos, margas e calcários	65 – 130**	17.844.675	16,1
UL 7	Formação de Amaral	Kimeridgiano superior**	Calcários corálicos	30 – 80**	17.656.300	16,0
UL 8	Calcários “recifais de Quintas”	Kimeridgiano inferior (?)***	Calcários recifais	(?)	513.550	0,5
UL 9	Formação de Abadia	Kimeridgiano Inferior a Médio (?)**	Argilas, margas e arenitos	800* 1200 - 2500**	63.896.250	57,8
UL 10	Arcoses de Castanheira do Ribatejo	Oxfordiano (?) - Kimeridgiano ***	Arcoses	1500*	162.425	0,1
UL 11	Filões e massas vulcânicas	----	Traquibasalto, basalto, doleritos, techenitos, rocha básica alterada/não identificada	(?)	631.600	0,6
					110.572.875	100

(*) Zbyszewski e Assunção (1965); (**) Kullberg *et al.* (2006; 2013); (***) INETI (2005); (†) A área de cada unidade litológica (UL) foi determinada a partir do mapa litológico em formato matricial. As unidades litológicas sedimentares (UL1 a UL10) estão ordenadas de acordo com o critério idade.

Do ponto de vista estrutural destacam-se a presença de um empolamento tectónico de grande raio de curvatura centrado na região de Arruda dos Vinhos (Zbyszewski e Assunção, 1965) e a cortar as diferentes formações geológicas, um padrão de fracturação marcado pela presença de duas famílias de acidentes (Zbyszewski e Assunção, 1965):

- (i) acidentes NE-SW - um grande número de filões na região segue esta direcção;
- (ii) acidentes NW-SE - correspondem aos acidentes mais modernos da região.

2.3. CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA E INSTABILIDADE DE VERTENTES

A área de estudo reflete do ponto de vista geomorfológico uma estreita dependência entre estrutura geológica e a diferente resistência à erosão, plasticidade e permeabilidade dos materiais (*e.g.*, arenitos, argilitos, margas, calcários) (Coelho, 1979). A morfologia atual na bacia é dominada pela presença de uma depressão (inversão de relevo) originada por erosão diferencial, estando os materiais mais antigos e mais brandos como os associados à UL9 a aflorar no centro da bacia do RGP (*e.g.*, Ferreira, 1984; Zêzere, 1991). Acima da UL9, aflora um complexo litológico onde espessas bancadas de calcários corálicos compactos e muito resistentes (UL7) dão origem a cornijas calcárias, que se estendem em crista pelo bordo da depressão de Arruda e são a causa de grande parte das áreas mais declivosas na bacia (*e.g.*, Machado, 1991; Oliveira, 2012). Neste contexto geomorfológico, as vertentes com disposição monoclinal tendem a apresentar reversos bastante suaves (para o exterior da bacia do RGP) e anversos mais abruptos (pelo menos nas áreas associadas à presença dos calcários corálicos compactos – UL7) (*e.g.*, Ferreira, 1984; Machado, 1991). Na generalidade, o relevo na bacia está compreendido entre os 440 m de altitude a oeste (Alqueidão) e os 10 m de altitude a este (setor jusante da bacia a NNW de Quintas) (Figura 2.2). As vertentes na bacia do RGP são caracterizadas por declives suaves a moderados como se pode constatar pelos 87,5 % da área de estudo com declives <15° (cf. Secção 3.2; Oliveira *et al.*, 2015).

Este contexto geomorfológico particular aliado a um regime de precipitação irregular favorece a rápida evolução das vertentes, em particular pela ocorrência de movimentos de massa em vertente (Ferreira, 1984; Ferreira e Zêzere, 1997). Os movimentos de vertente, na região norte de Lisboa são desencadeados essencialmente por precipitação (Zêzere e Trigo, 2011) e associados a períodos de precipitação persistente e prolongada (30-90 dias) ou

associados a sequências de precipitação muito intensa e concentrada (1-15 dias) (*e.g.*, Ferreira, 1984; Zêzere *et al.*, 2015). Relativamente ao comportamento hidrogeológico das diferentes formações, distinguem-se duas situações distintas (*e.g.*, Coelho, 1979; Ferreira e Zêzere, 1997; Pimenta, 2011; Oliveira, 2012; Jesus *et al.*, 2017):

(i) a ocorrência de movimentos de vertente de maior dimensão e mais profundos na UL9 associados a períodos de precipitação persistente e prolongada. Os calcários corálicos (UL7) localizados no topo desta unidade funcionam como área de recarga permitindo a percolação lenta da água no complexo de margas e argilas menos permeáveis (UL9) potenciando a instabilização desta unidade, por subida do nível freático, mesmo em setores da vertente mais próximos do topo;

(ii) a ocorrência de movimentos de vertente superficiais associados a períodos de precipitação de curta duração, mas intensa e concentrada em áreas de declives mais acentuados, afetando no essencial os solos de cobertura silto-argilosos cuja composição é assumida como muito próxima da rocha-mãe (*e.g.*, Oliveira *et al.*, 2017). Apesar da baixa permeabilidade destes materiais (maior na presença de intercalação de níveis de calcários ou arenitos) evidenciam grande sensibilidade à variação do nível freático e ao aumento rápido da pressão da água nos poros.

Propositadamente deixado em branco

CAPÍTULO 3. INFORMAÇÃO CARTOGRÁFICA E DADOS DE BASE

3.1. INFORMAÇÃO CARTOGRÁFICA

A informação cartográfica e os dados de base descritos e caracterizados nesta seção constituem a base para a determinação da vulnerabilidade física de estradas e edifícios a movimentos de vertente, para a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente e para a avaliação da exposição a movimentos de vertente e determinação de perdas potenciais. A preparação e uniformização das diferentes estruturas e formatos de dados (Tabela 3.1) nem sempre se configuraram fáceis, em particular, pela dificuldade na aquisição para a mesma escala de referência (1:10 000) da informação relativa aos elementos expostos (estradas e edifícios) em formato vetorial.

Tabela 3.1 - Fontes cartográficas - Formato e estrutura dos dados de base.

Escala/ Data	Designação	Formato/estrutura	Produtor (proprietário)
1:50 000	Carta Geológica de Portugal	Analógico	Serviços Geológicos de Portugal
1:25 000	Carta Militar de Portugal	Analógico	Instituto Geográfico do Exército (IGE)
1:25 000	Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS90)	Vetorial (polígonos)	Instituto Geográfico Português (IGP)
1:25 000	Carta de Solos (SROA/ CNROA/ IEADR/IHERA/IDRHa/ DGADR)	Analógico	Direção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural (DGADR)
1:25 000	Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP)	Vetorial (polígonos)	Direção Geral do Território (DGT)
1:10 000	Altimetria	Vetorial (linhas, pontos)	Associação dos Municípios do Oeste
1:10 000	Ortofotomapas	Imagem / matricial (célula 0,5x0,5 m)	Associação dos Municípios do Oeste
1:10 000	Rede viária e infraestruturas	Vetorial (linhas, pontos, polígonos)	Associação dos Municípios do Oeste
Março 2018	Edificado	Estatística	Instituto Nacional de Estatística

Relativamente à base do modelo numérico de elevação para a bacia do Rio Grande da Pipa foi utilizado um modelo altimétrico à escala 1:10 000, com curvas de nível com equidistância de 5 metros descrito em Oliveira (2012), reproduzido em estrutura matricial (5 metros por 5 metros)

3.2. INVENTÁRIO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE E SELEÇÃO DE MOVIMENTOS DE VERTENTE QUE GERARAM DANOS EM ESTRADAS E EDIFÍCIOS

O inventário histórico de movimentos de vertente da bacia do Rio Grande da Pipa foi obtido por Oliveira (2012) e tem 1434 registos de movimentos de vertente (Figura 3.1). A inventariação multitemporal dos movimentos de vertente teve por base um levantamento sistemático de campo das manifestações de instabilidade entre 2006 e 2010, apoiado por cartografia sobre ortofotomapas à escala 1:10 000, com célula de 0,5 m reproduzidos na escala 1:2 000 (Oliveira, 2012). A inventariação dos movimentos de vertente foi ainda complementada com (Oliveira *et al.*, 2015): a fotointerpretação de fotografias aéreas verticais (1983, 1989) na escala 1:15 000 e ortofotomapas datados de 2004 a 2007; e a interpretação de modelos de relevo sombreado derivados de um modelo numérico de elevação resultante de modelo topográfico à escala 1:10 000. O total de área afetada por movimentos de vertente na área de estudo é de quase 6,5 km² correspondendo a 5,9 % da bacia do Rio Grande da Pipa (Oliveira *et al.*, 2015). A distribuição dos movimentos de vertente por tipologia e respetiva área instável encontra-se sistematizada na Tabela 3.2. Na área de estudo a ocorrência de movimentos de vertente do tipo deslizamento rotacional é predominante (69 %). Se considerarmos a área afetada por movimentos de vertente destacam-se os deslizamentos rotacionais profundos com quase 93,1 % do total de área instabilizada. A tipologia dos movimentos de vertente segue a classificação proposta por Cruden e Varnes (1996) e a separação entre deslizamentos superficiais e profundos é feita pela posição da superfície de rotura, a menos ou a mais de 1,5 m de profundidade, respetivamente (Záruba e Mencl, 1982).

Tabela 3.2 - Tipologia e frequência de movimentos de vertente na bacia do Rio Grande da Pipa.
Adaptado de Oliveira *et al.* (2015).

Tipo de movimento de vertente	Movimentos de vertente		Área instabilizada		Área de estudo (%)
	(#)	(%)	(m ²)	(%)	
Deslizamento rotacional profundo	572	39,9	6034204	93,1	5,46
Deslizamento rotacional superficial	417	29,1	319018	4,9	0,29
Deslizamento translacional profundo	5	0,3	9344	0,1	0,008
Deslizamento translacional superficial	382	26,6	78095	1,7	0,07
Complexo	2	0,1	17119	0,3	0,015
Escoda	33	2,3	19033	0,3	0,017
Desabamento	16	1,1	5814	0,1	0,005
Balançamento	7	0,5	1775	0,03	0,002
Total	1.434	100	6.484.402	100	5,9

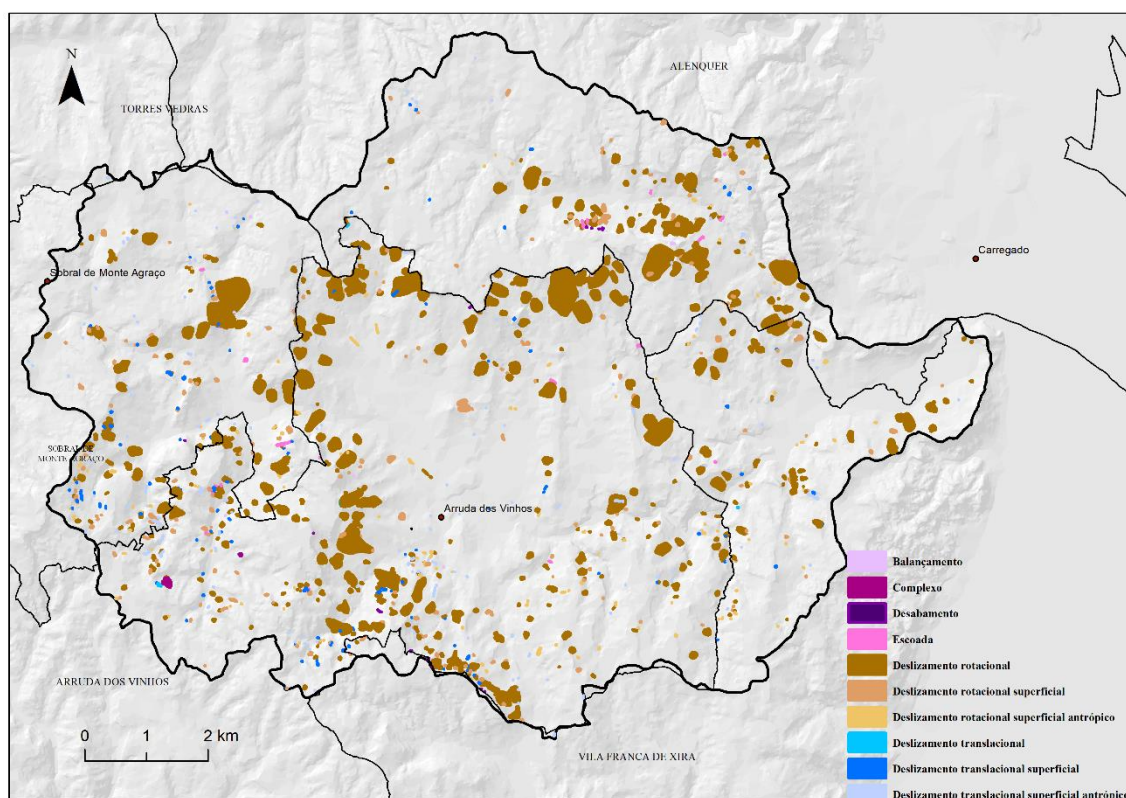


Figura 3.1 - Inventário de movimentos de vertente na bacia do Rio Grande da Pipa. Fonte: Oliveira (2012).

Do inventário histórico de movimentos de vertente da bacia do Rio Grande da Pipa, foram selecionados 395 movimentos de vertente do tipo deslizamento dos 402 movimentos de vertente que provocaram danos em edifícios e/ou em vias de comunicação para avaliar a vulnerabilidade física de estradas e edifícios a movimentos de vertente (Figuras 3.2 e 3.3, Tabela 3.3). Destes 395 deslizamentos, 42 afetaram edifícios e 353 afetaram estradas. Os registos de danos em edifícios e estradas por outros tipos de movimentos de vertente, como por exemplo, escoada ou balançamento, são muito reduzidos ou mesmo inexistentes (Tabela 3.3), pelo que se limitou a análise neste trabalho aos danos provocados por deslizamentos. Relativamente aos movimentos de vertente do tipo deslizamento, constata-se que a maior parte dos registos de danos estão associados à ocorrência de deslizamentos translacionais superficiais (41,5 %), na maioria dos casos ocorridos em taludes de estrada, e à ocorrência de deslizamentos rotacionais profundos e superficiais com 28,4 % de casos cada (Tabela 3.3).

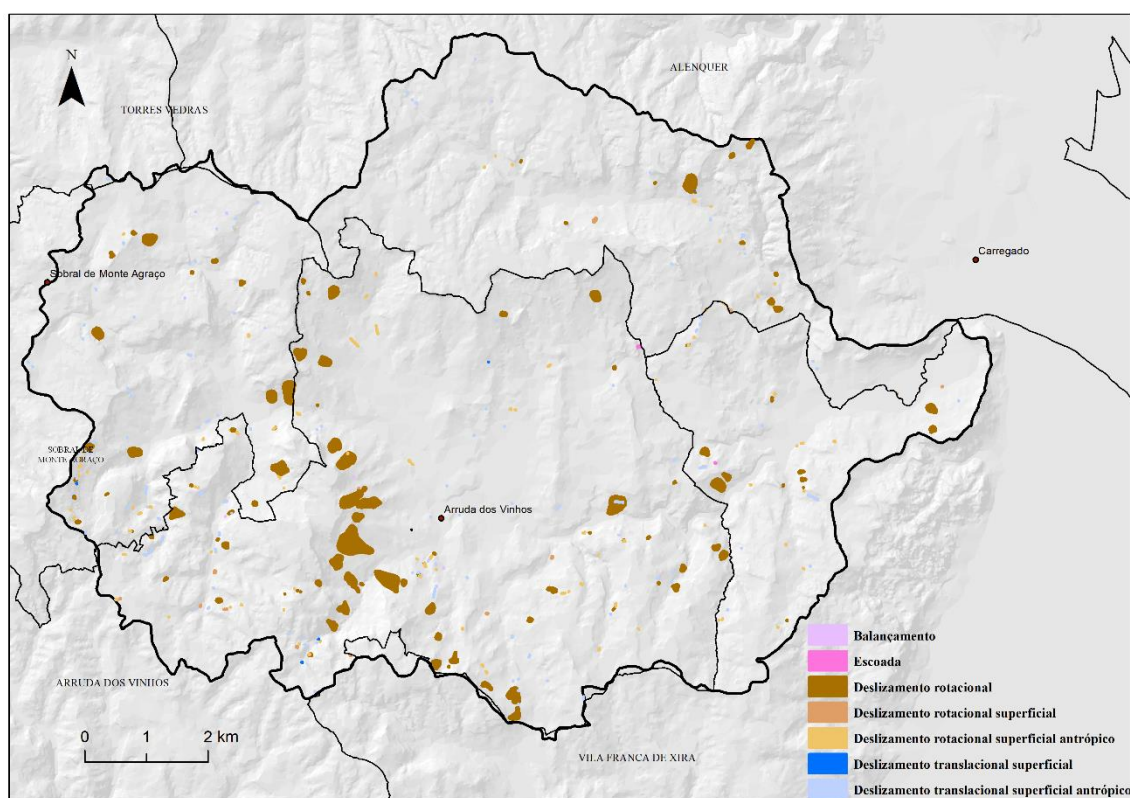


Figura 3.2 - Inventário de movimentos de vertente que geraram danos em edifícios e estradas na bacia do Rio Grande da Pipa. Fonte: Oliveira (2012).



Figura 3.3 - Deslizamentos ocorridos na bacia do Rio Grande da Pipa que originaram danos em estradas. A) deslizamento rotacional com cicatriz a afetar mais de uma faixa de circulação de estrada rural; B) deslizamento translacional superficial no talude inferior de estrada nacional.

Tabela 3.3 - Tipologia e frequência de movimentos de vertente que causaram danos em estradas e edifícios na bacia do Rio Grande da Pipa. Adaptado de Oliveira (2012).

Tipo de movimento de vertente	Movimentos de vertente que causaram danos	
	(#)	(%)
Deslizamento rotacional profundo	114	28,4
Deslizamento rotacional superficial	114	28,4
Deslizamento translacional superficial	167	41,5
Escoada	4	1,0
Balançamento	3	0,7
Total	399	100

3.3. FATORES DE PREDISPOSIÇÃO

A instabilidade geomorfológica tem origem num conjunto muito variado de condições e processos (Popescu, 2002), que podem ser estáticos ou dinâmicos e que são classificados pela influência que exercem na promoção da ocorrência de instabilidade nas vertentes (Popescu, 1994) classificados como: fatores de predisposição, preparatórios e desencadeantes. A avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente com base em métodos estatísticos tem por base a utilização de fatores de predisposição, que são estáticos. Estes, assumem-se, representativos das características dos terrenos, e por essa via utilizados como fatores causais da instabilidade, relação indispensável para a predição espacial de futuros movimentos de vertente. Os fatores de predisposição a utilizar na avaliação da suscetibilidade a deslizamentos para a bacia do Rio Grande da Pipa foram sistematizados por Oliveira (2012) e têm sido utilizados com sucesso na determinação estatística da relação entre fatores de predisposição e movimentos de vertente noutros trabalhos similares na área de estudo (Lajas, 2016; Oliveira *et al.*, 2015, 2017). São assim considerados sete fatores de predisposição, sendo os primeiros quatro derivados direta ou indiretamente do modelo numérico de elevação: curvatura, exposição, declive, IWI (inverso do *wetness index* ou *slope over area ratio*), litologia, tipo de solo, uso e ocupação do solo. A litologia foi previamente descrita na seção 2.2.

PERFIL TRANSVERSAL

O perfil transversal reproduz no essencial a variação de declive ao longo da vertente e por essa via traduz o potencial para aumento ou diminuição da velocidade do escoamento superficial e consequente potencial para a acumulação e infiltração da água no solo. O perfil transversal tem por base uma célula de 50 m (resolução mais grosseira quando comparado com a dos outros fatores de predisposição), tem sido utilizada no contexto da região norte de Lisboa, pelo melhor ajuste espacial à morfologia das vertentes (Zêzere *et al.*, 2004; Guillard-Gonçalves e Zêzere, 2012; Garcia, 2012; Oliveira, 2012; Guillard-Gonçalves *et al.*, 2015; Oliveira, 2016).

O perfil transversal e as vertentes classificadas em áreas côncavas, convexas e retilíneas/planas foram as selecionadas (Figuras 3.4 e 3.5). As áreas planas estão maioritariamente associadas a topos e fundos de vale. A classe com maior

representatividade é a da curvatura côncava com 34,6 %, pese embora, com uma distribuição não muito diferente das restantes classes de curvatura.

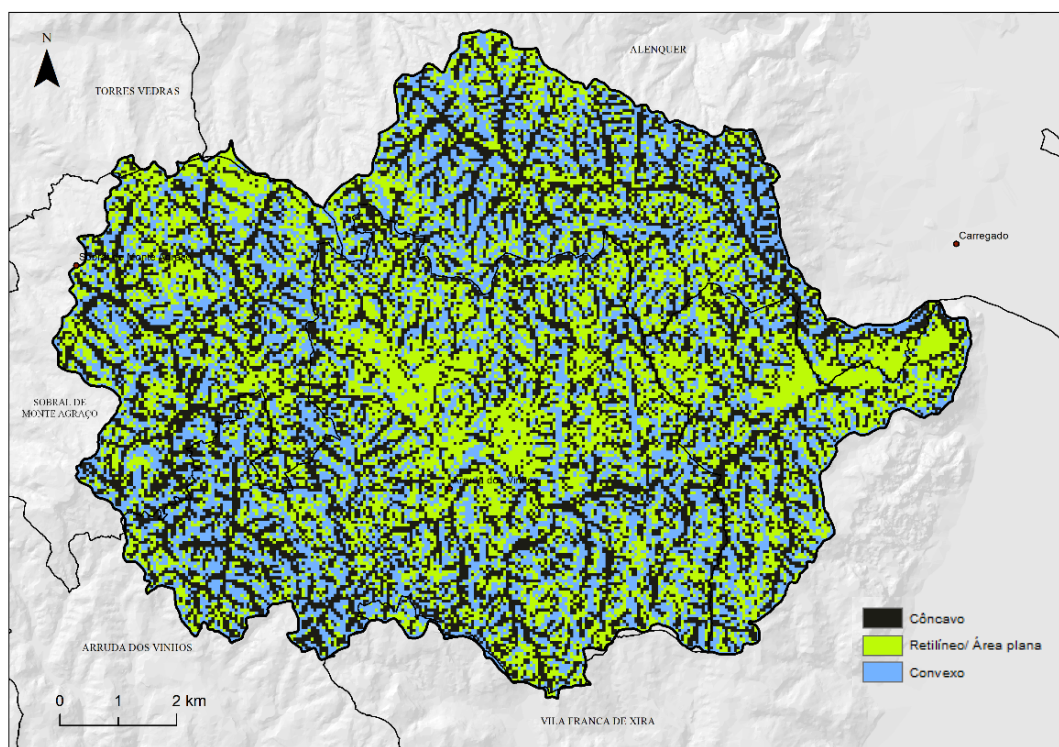


Figura 3.4 – Perfil transversal na bacia do RGP expressa pelo perfil transversal das vertentes (retilíneo/ área plana)

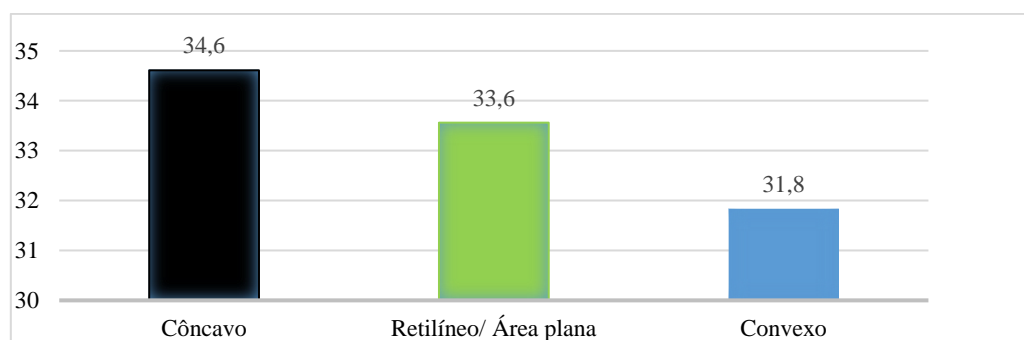


Figura 3.5 - Frequência relativa por classe do perfil transversal expressa das vertentes na bacia do RGP.

EXPOSIÇÃO

A exposição numa base de classificação célula a célula é expressa pela direção da maior inclinação entre uma determinada célula e as 8 células vizinhas (Baeza *et al.*, 2010). A exposição é calculada entre 0° e 360°, representando o valor -1 designadamente as áreas planas. Posteriormente é reclassificada em 9 classes, uma respeitante às áreas planas e as restantes 8 dividindo a exposição em setores de 45°, isto é, o setor classificado com exposição norte abrange uma variação da exposição entre 337,5° e 22,5°, a exposição a nordeste abrange uma variação da exposição entre 22,5° e 67,5° e assim sucessivamente. Esta variável quando utilizada para avaliar a suscetibilidade a movimentos de vertente tem muitas vezes uma forte relação com a morfoestrutura existente na área de estudo (Reis *et al.*, 2003) ou com aspetos mais climáticos, como sejam uma maior predisposição para as vertentes expostas a N e NW nas médias latitudes serem mais sombrias, frias e húmidas (Clerici *et al.*, 2010). As vertentes na área de estudo (Figuras 3.6 e 3.7) estão expostas predominante a este (16 %) e a nordeste (14,1 %). A exposição das restantes vertentes na área de estudo apresenta uma similar distribuição pelos restantes octantes (entre 12,4 % a 10,6 %). As áreas planas do ponto de vista da exposição são residuais (0,5 %).

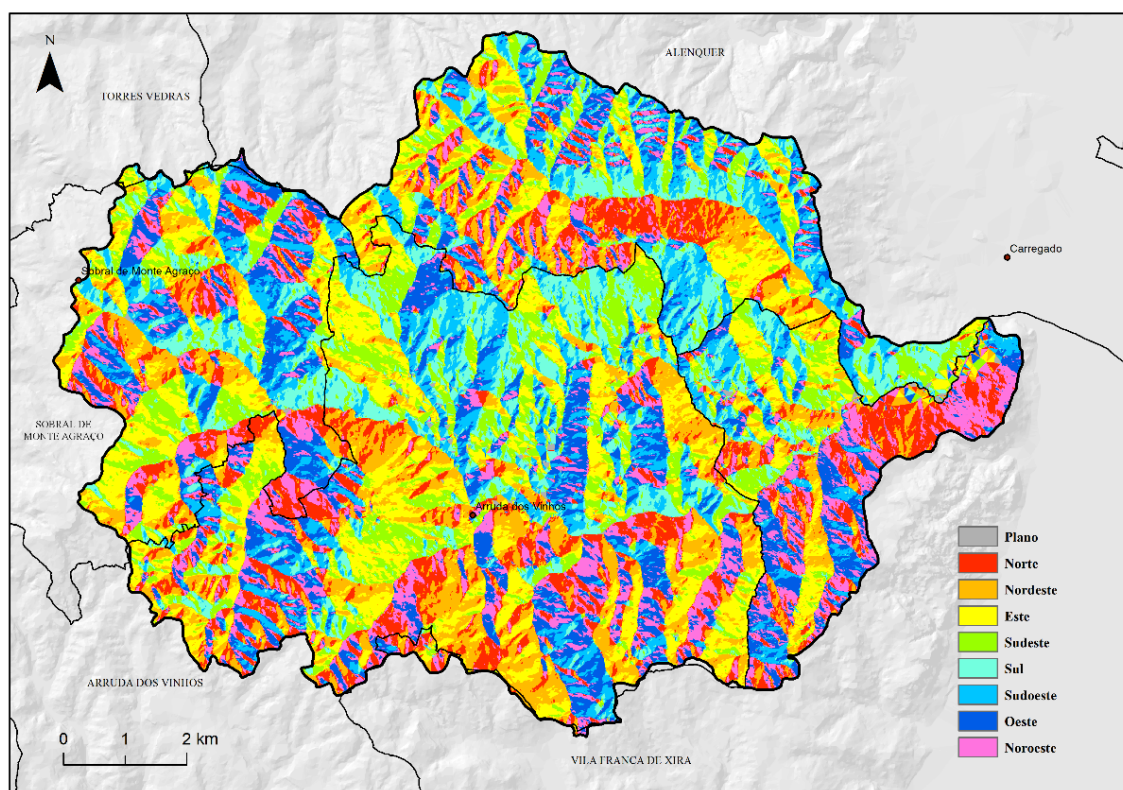


Figura 3.6 - Exposição das vertentes na bacia do RGP

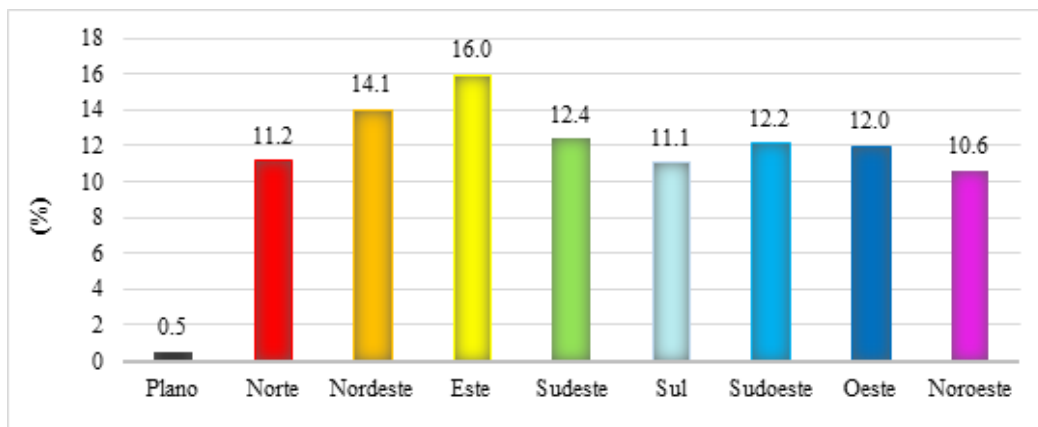


Figura 3.7 – Frequência relativa por classe de exposição das vertentes na bacia do RGP

DECLIVE

O declive a par da litologia é tipicamente considerada como uma das variáveis que mais influencia a ocorrência de movimentos de vertente (Clerici *et al.*, 2010) e expressa em graus a variação da inclinação da superfície topográfica. O declive foi classificado, em 11 classes de acordo com a proposta apresentada por Oliveira (2012). As classes de declives mais representadas na área de estudo (Figuras 3.8 e 3.9) são: 5 - 10° (42 %), 10 - 15° (23 %) e 2 - 5° (17 %). As classes de declive superior a 20° são as que apresentam menor representatividade espacial.

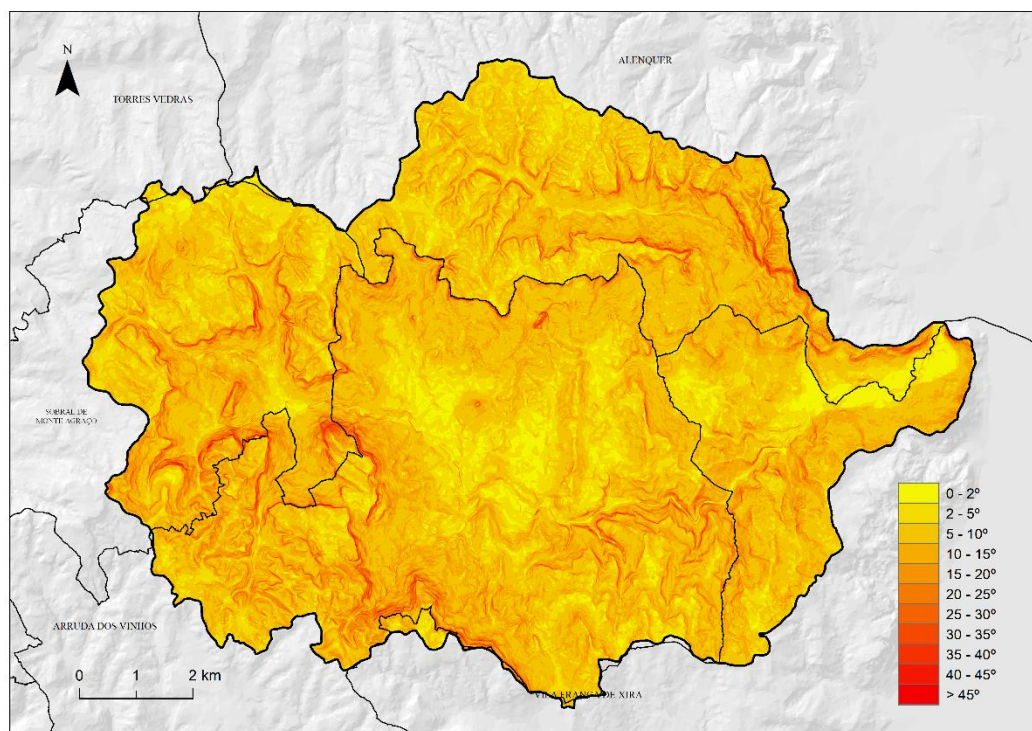


Figura 3.8 - Declive em graus na bacia do RGP

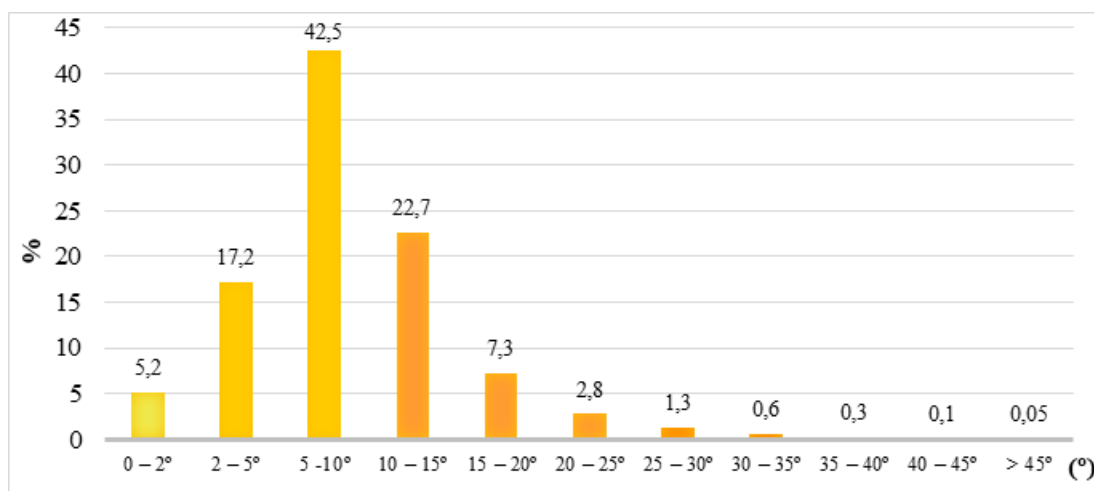


Figura 3.9 - Frequência relativa por classe de declive na bacia do RGP

IWI – INVERSO DO WETNESS INDEX

O inverso do *Wetness Index* (IWI) ou SOAR (*slope over area ratio*), tem sido utilizado para determinar em cada célula o controlo topográfico nos processos hidrológicos com base na relação entre inclinação e área de contribuição. Esta variável é assim representativa do potencial para ocorrer acumulação de água, ou embebedimento dos terrenos (Oliveira, 2012) é de certa forma representativa da variação espacial das condições hidrológicas, que controlam a humidade dos solos e escoamento subterrâneo, que muitas vezes reproduz o escoamento superficial (Sørensen *et al.*, 2006). Para o Inverso do *Wetness Index* (IWI) foram definidas 7 classes aplicando um intervalo de classes baseado numa progressão logarítmica de base 10 (Oliveira, 2012). A classe iwi_1 corresponde essencialmente às áreas em fundo de vale (maior potencial para ocorrer acumulação de água) e a classe iwi_7 traduz áreas com um potencial de acumulação baixo (interflúvios). A classe iwi_5 é a que apresenta uma maior predominância na área de estudo com 59,8 %, em segundo é a classe iwi_4 com 25,3 %, as classes que apresentam menor significância são as classes iwi_1, iwi_2 e iwi_7 com 1,3 %, 1,1% e 0,03 %, respetivamente (Figuras 3.10 e 3.11).

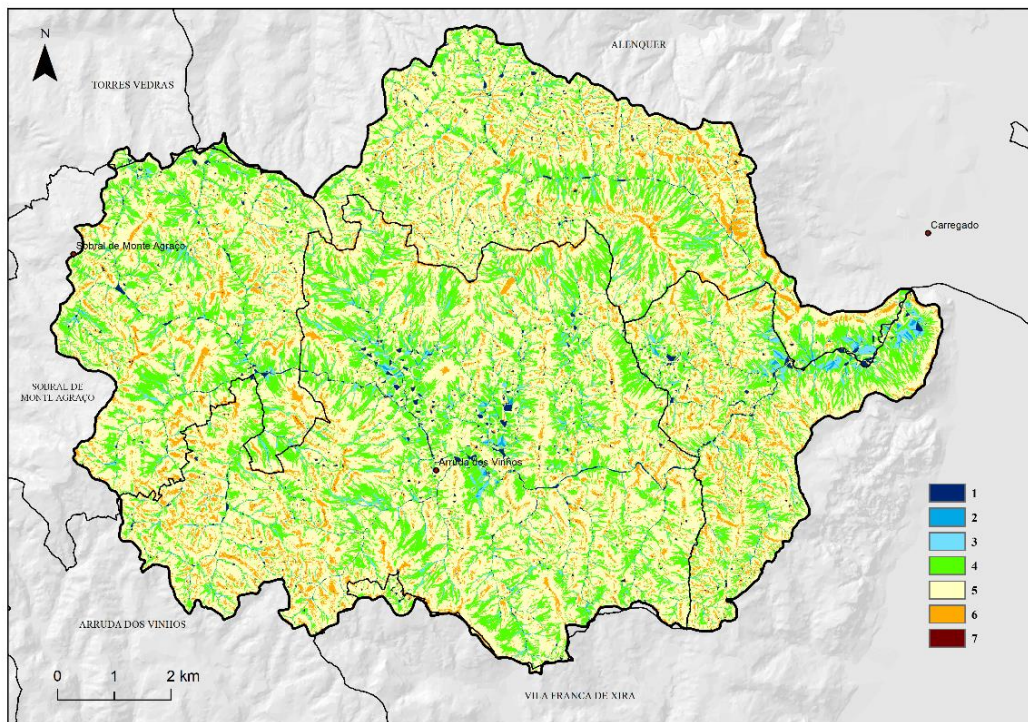


Figura 3.10 - Inverso do *Wetness Index* (IWI) na bacia do RGP

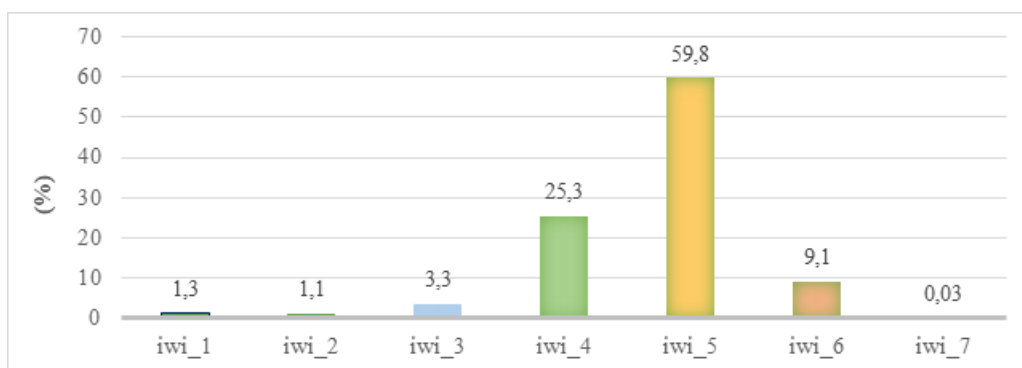


Figura 3.11 - Frequência relativa por classe de Inverso do *Wetness Index* (IWI) na bacia do RGP

SOLO

O mapa dos solos é utilizado como um indicador das formações superficiais e com mais ressalvas como indicador da própria espessura do solo, ambos, fatores condicionantes para a ocorrência de movimentos de vertente (Garcia, 2012). Os solos superficiais na bacia do RGP têm sido reconhecidos como rególitos ou depósitos coluviais, pouco

espessos, com uma composição próxima da rocha mãe sofrendo pouca mobilização ao longo das vertentes, função da reduzida energia das formas de relevo (Oliveira *et al.*, 2017). O tipo de solo com maior significância espacial (Figuras 3.12 e 3.13) é o cambissolo distribuindo-se por 71,3 % da área de estudo. O luvisso (solo argiluvado) e o vertissolo (barros) abrangem 11 % e 8,2 % da bacia do RGP, respetivamente. Os outros tipos de solos têm uma expressão residual na área de estudo, igual ou inferior a 1 %.

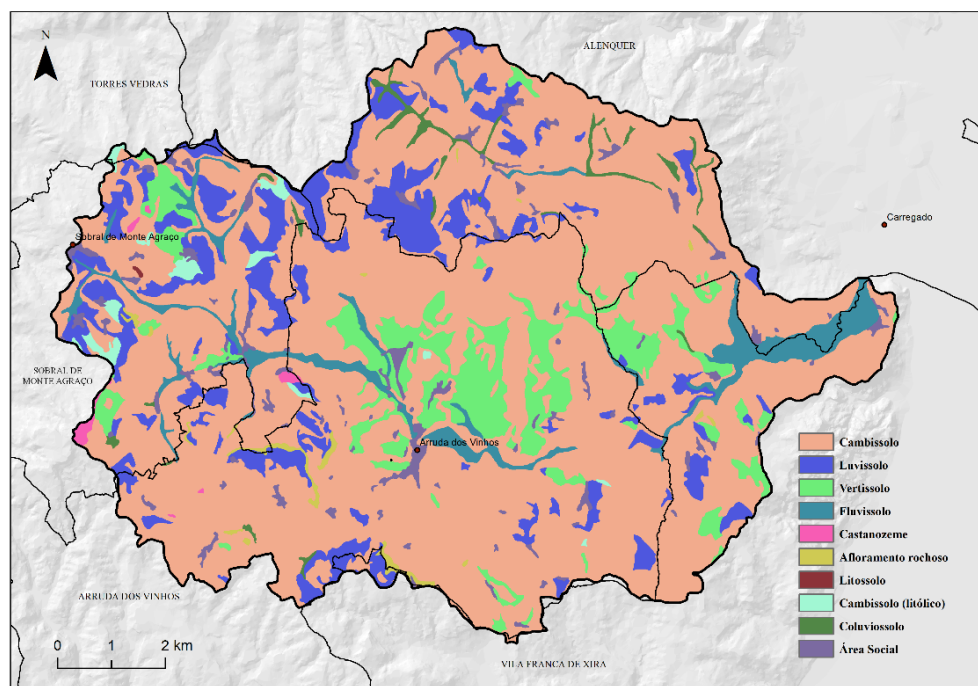


Figura 3.12 - Tipo de solo na bacia do RGP.

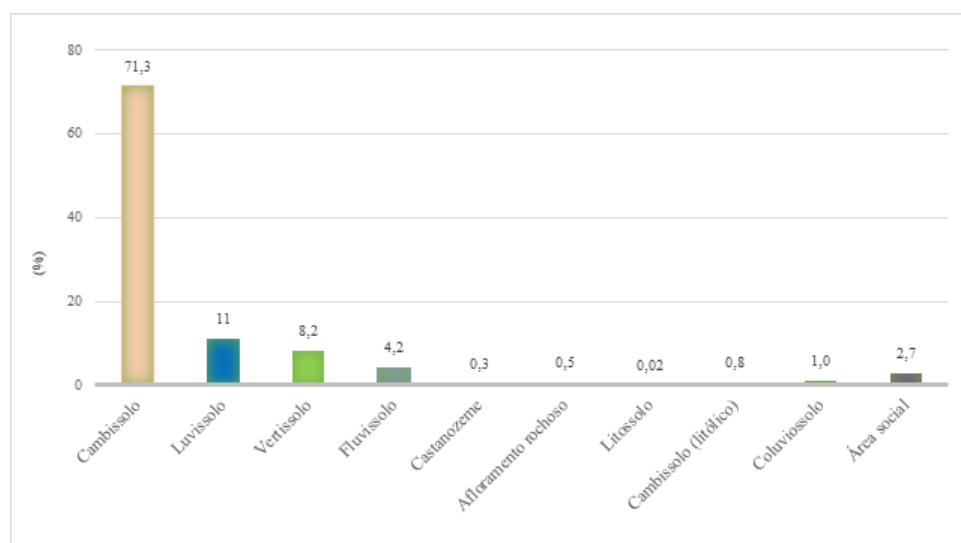


Figura 3.13 - Frequência relativa por classe de tipo de solo na bacia do RGP.

USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A relação entre o tipo de uso do solo e a ocorrência de movimentos de vertente nem sempre é clara. Ainda assim a manutenção de práticas agrícolas menos apropriadas que promovam o aumento do escoamento superficial, que intensifiquem a erosão e a instabilidade das vertentes (por aumento da infiltração da água no solo) ou o abandono da atividade agrícola com a consequente substituição/recuperação dessas áreas por vegetação herbácea, matos e floresta levando a que facilmente se mantenham os vestígios dos movimentos de vertente no tempo (Persichillo *et al.*, 2017). A cartografia de uso e ocupação do solo foi obtida por reclassificação da Carta de Uso e Ocupação do Solo de 1990 (COS90). A classe área agrícola heterogénea é a que tem uma maior percentagem na área de estudo (38,6%), de seguida a vinha, área agrícola e pomar com 17,5 %, 16,4 % e 11,6 %, respetivamente (Figuras 3.14 e 3.15).

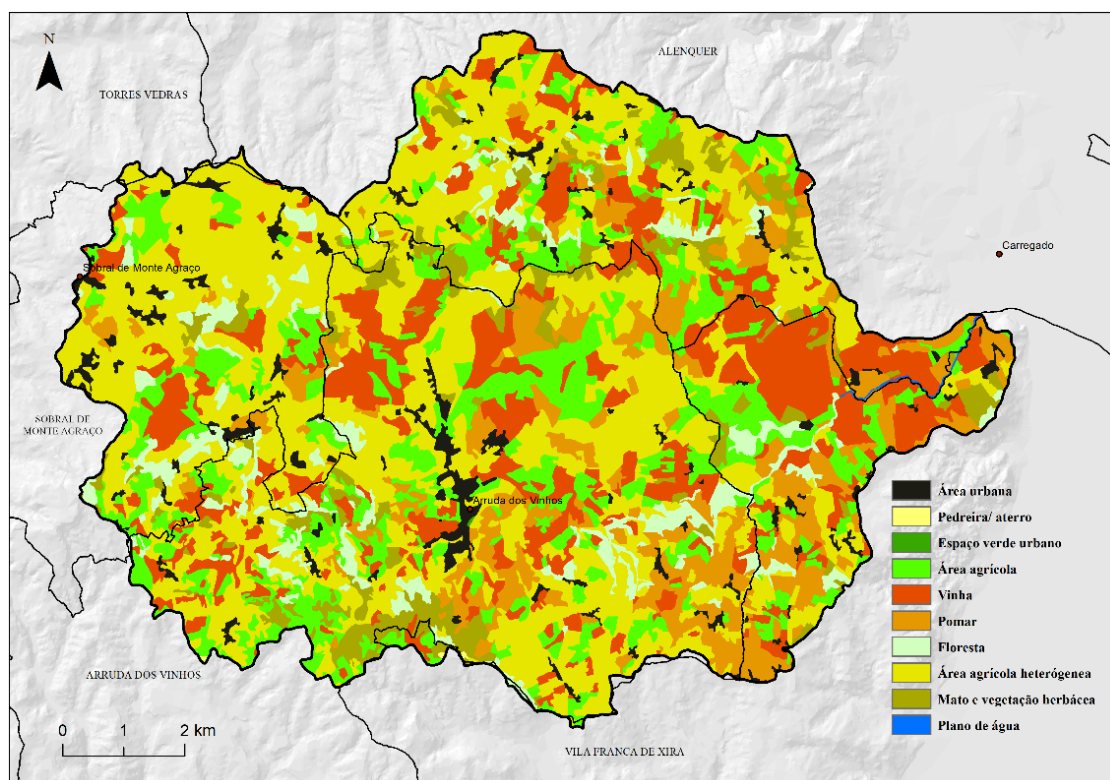


Figura 3.14 - Uso do solo na bacia do RGP

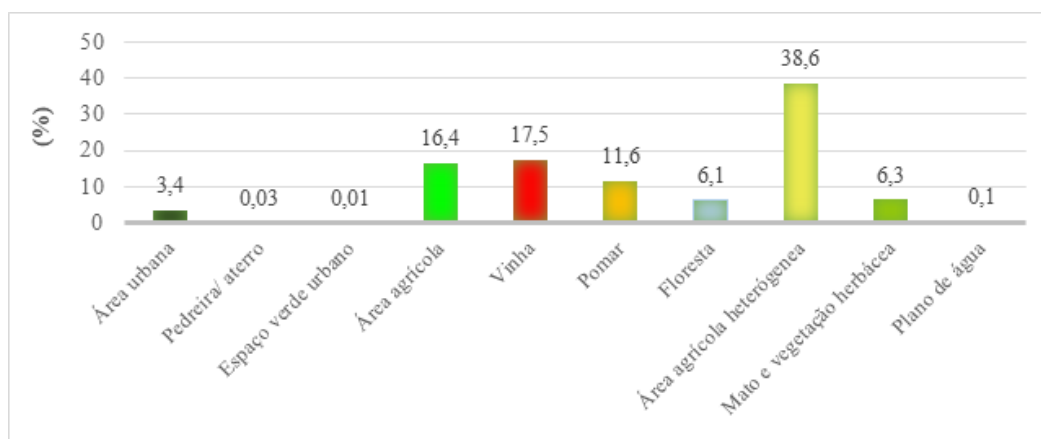


Figura 3.15 - Frequência relativa por classe de uso do solo na bacia do RGP

3.4. TIPOLOGIA, DISTRIBUIÇÃO DAS ESTRADAS E DOS EDIFÍCIOS E EXPOSIÇÃO A MOVIMENTOS DE VERTENTE

Os diferentes tipos de estrada e de edifícios, definidos a partir da sua tipologia de construção são usados neste trabalho para determinar a vulnerabilidade física e a exposição a movimentos de vertente.

Na avaliação da vulnerabilidade física serão utilizadas apenas os troços de estradas ou os edifícios que foram afetados por movimentos de vertente na bacia do Rio Grande da Pipa. A avaliação da exposição a movimentos de vertente e subsequente determinação das perdas potenciais ligadas a estradas e edifícios, será efetuada numa área amostra na bacia do Rio Grande da Pipa cujos limites são definidos pela área da bacia adstrita ao município de Arruda dos Vinhos (Figura 3.16), este constrangimento espacial a uma área amostra teve por base a impossibilidade em tempo útil de aceder ou atualizar a distribuição das estradas e edifícios para toda a bacia do Rio Grande da Pipa.

A resistência dos edifícios e das estradas está intrinsecamente relacionada com a tipologia de construção, e por essa via tem sido possível individualizar genericamente quatro categorias distintas de estradas e edifícios (Garcia, 2012; Oliveira, 2016). As estradas de acordo com a relação tipologia de construção/resistência estrutural são divididas (Glade, 2003) em: (V1) – estrada rural de terra batida ou com camada base ou de regularização de outros materiais menos resistentes (*e.g.* macadame, tout-venant) (V1a) – Caminhos rurais (estrada rural de terra batida sem camada base ou de regularização, e com

impossibilidade de passagem (largura) de veículo automóvel); (V2) – estrada municipal ou similar desde que asfaltada; (V3) – estrada nacional; (V4) – autoestrada.

Não entrando em detalhes relativos à rigidez/flexibilidade do tipo de pavimento e técnicas de construção, assume-se que a resistência estrutural das estradas aumenta progressivamente de V1 para V4.

A categorização dos edifícios definida pela relação tipologia de construção e resistência estrutural (Glade, 2003; Baggio *et al.*, 2007; Papathoma-Köhle, 2016) tem sido baseada nas seguintes classes: (E1) - edifícios com outros elementos resistentes (madeira, metal); (E2) – edifícios com pedra de adobe ou taipa; (E3) - edifícios com paredes de alvenaria argamassada; (E4) – edifícios com elementos resistentes de betão. À semelhança das estradas assume-se que a resistência estrutural dos edifícios face à ocorrência de movimentos de vertente aumenta progressivamente de E1 para E4, onde os edifícios com elementos resistentes de betão armado se apresentam tipicamente como os mais resistentes. Na área de estudo este levantamento foi apenas efetuado para os edifícios utilizados para avaliar os padrões de vulnerabilidade física. Nos restantes edifícios da área de estudo a tipologia foi inferida por BGRI a partir dos CENSOS 2011.

A distribuição de estradas por tipologia na área amostra, área do município de Arruda dos Vinhos inserida na bacia do Rio Grande da Pipa, pode ser observada na Figura 3.16. No caso dos edifícios, classificados como Elementos Vitais, Estratégicos e Sensíveis de acordo com a proposta de Julião *et al.* (2009), a sua distribuição é apresentada na Figura 3.17 e é apresentada de forma relativa (por BGRI) de acordo com a sua tipologia de construção nas Figuras 3.18 e 3.19. Através dos CENSOS de 2011, é possível verificar a frequência absoluta e calcular a frequência relativa de edifícios em cada BGRI consoante a sua tipologia de construção. Estes dados servirão de auxílio à determinação do tipo de edifício na avaliação da exposição e perdas potenciais relacionadas com a ocorrência de movimentos de vertente.

Nesta área “amostra” foram registados 827 movimentos de vertentes, destes 218 causaram danos: 218 casos de danos registados em troços de estradas e 17 casos de danos registados em edifícios. O número total de registos é ligeiramente superior ao número de movimentos de vertente reportado anteriormente (218 casos) devendo-se ao facto de um movimento de vertente poder afetar simultaneamente uma estrada e um edifício.

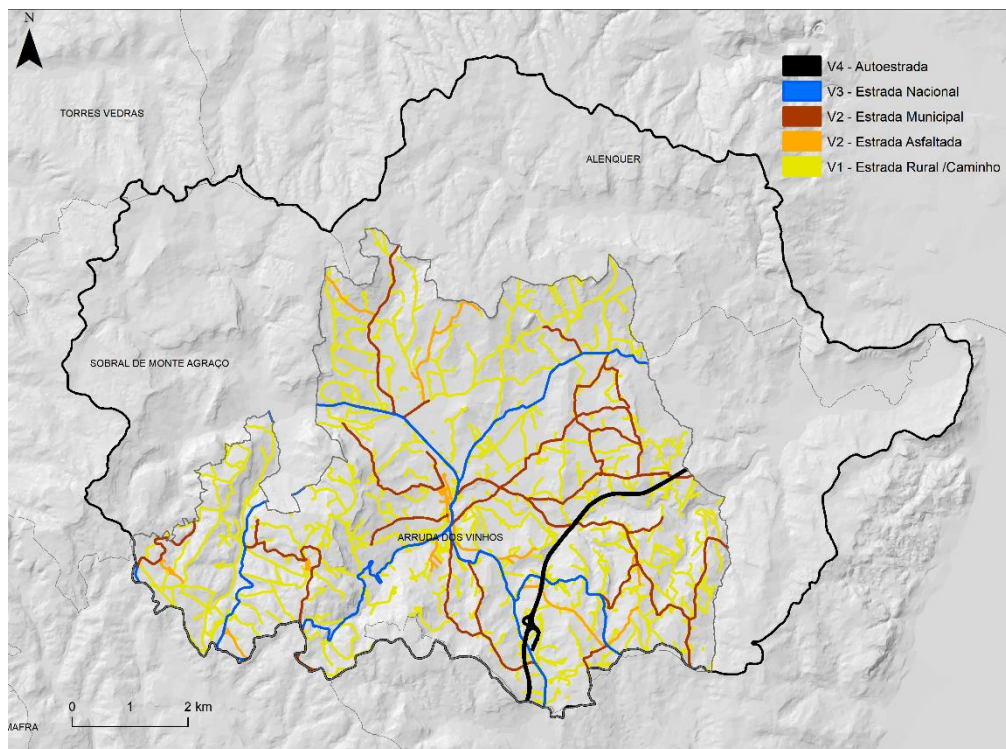


Figura 3.16 - Rede viária por tipo de estrada na área do município de Arruda dos Vinhos que se enquadra na bacia do RGP.

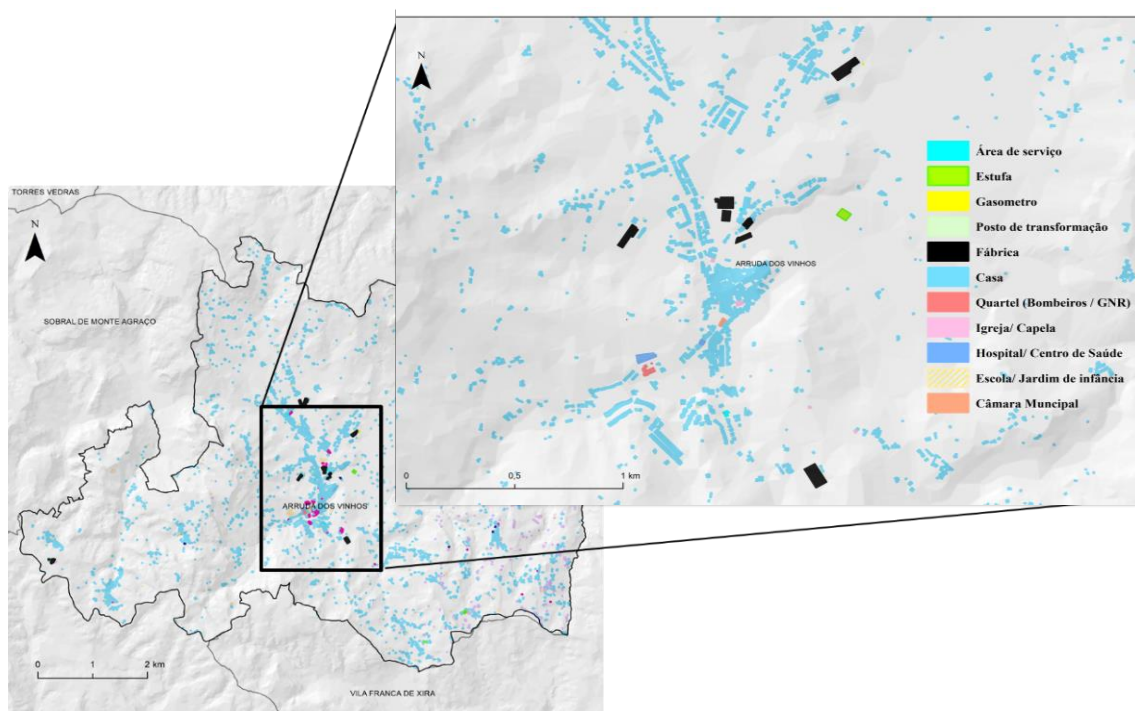


Figura 3.17 - Edifícios classificados como elementos vitais, estratégicos e sensíveis na área do município de Arruda dos Vinhos que se enquadra na bacia do RGP.

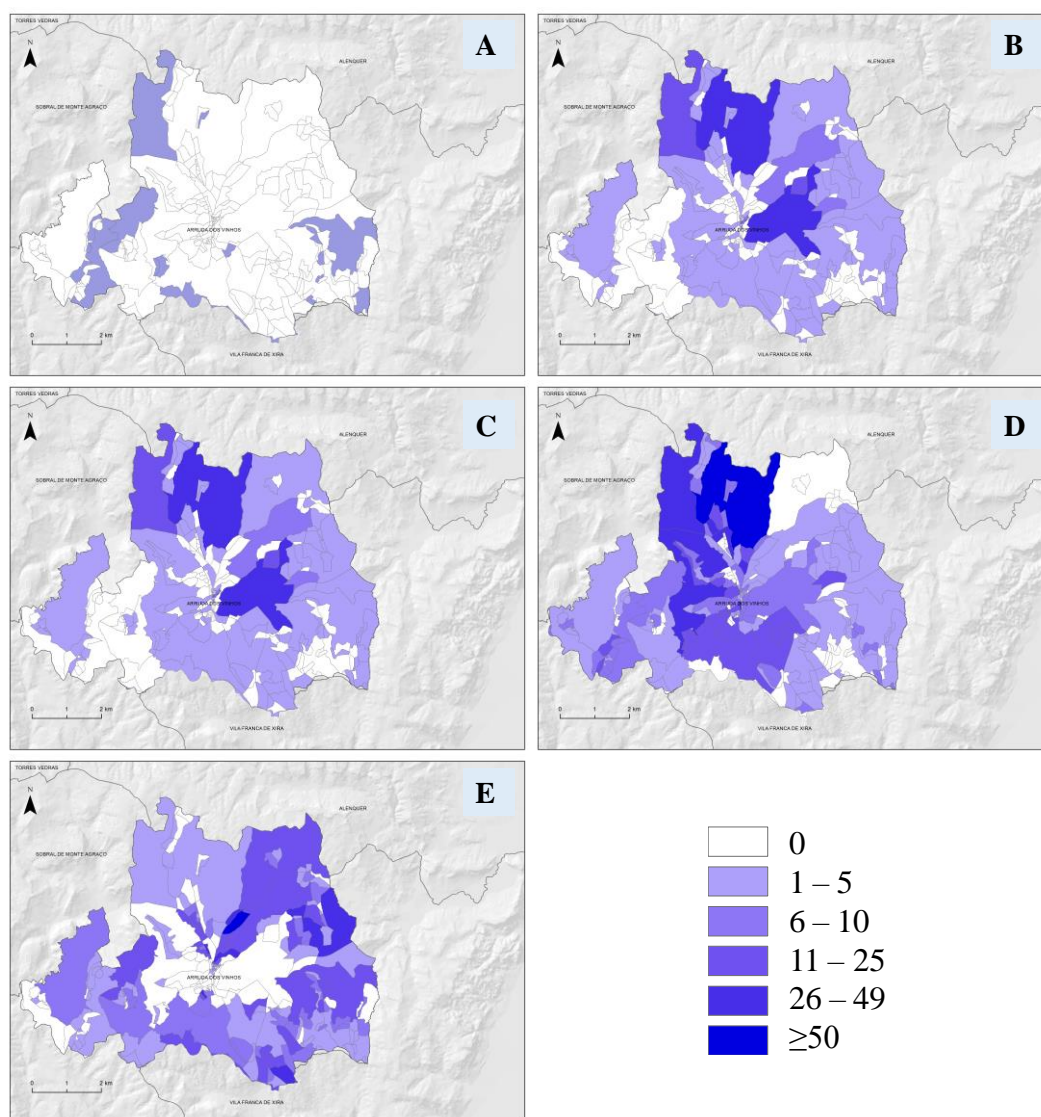


Figura 3.18 - Frequência por tipologia de edifícios, sendo: A – E1. Edifícios com outros elementos resistentes (madeira, metal); B – E2. Edifícios com pedra de adobe ou taipa; C – E3. Edifícios com paredes de alvenaria argamassada (sem placa); D – E3. Edifícios com paredes de alvenaria argamassada (com placa); E – E4. Edifícios com elementos resistentes de betão. Fonte dados: INE (março de 2019).

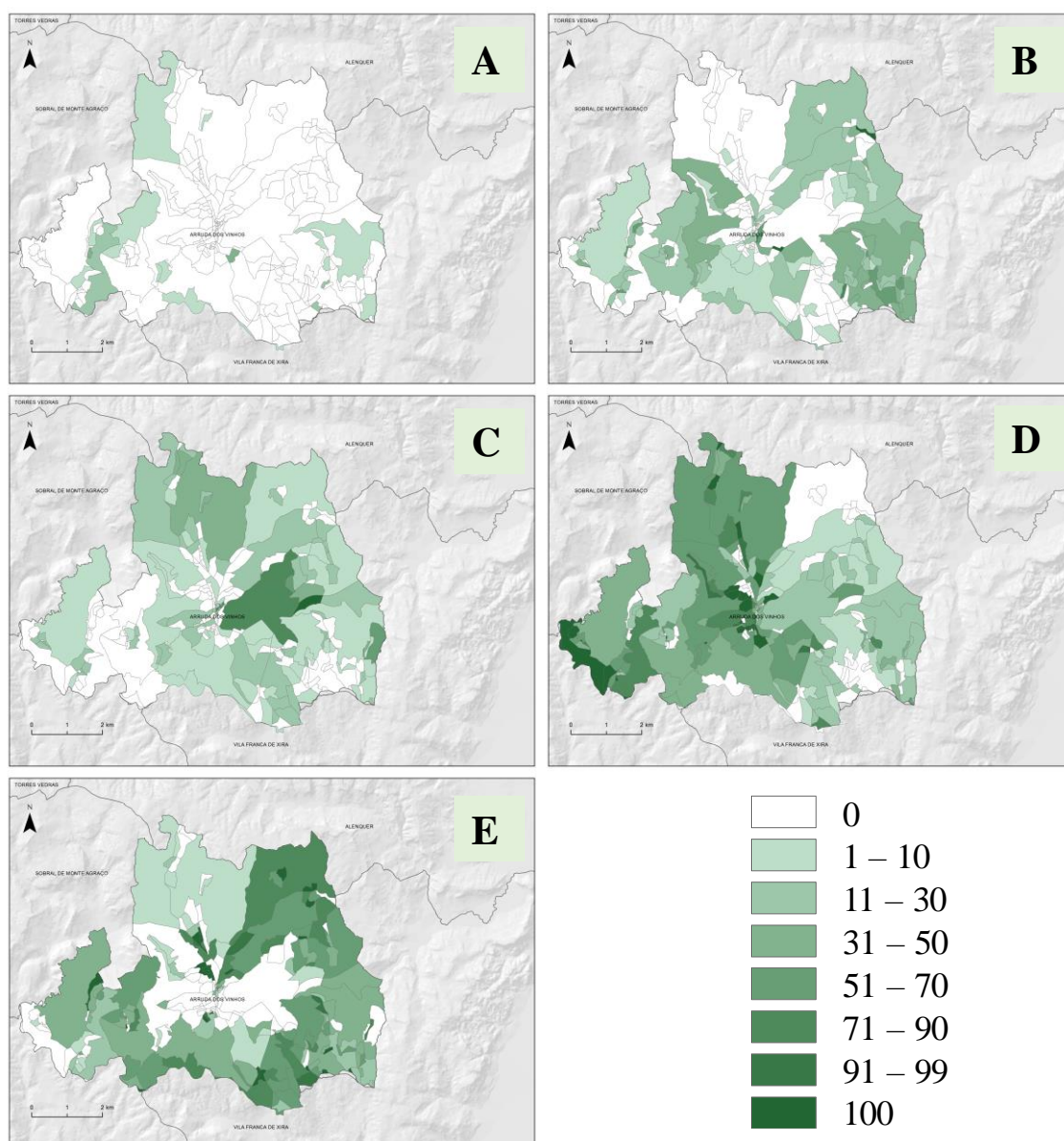


Figura 3.19 - Frequência relativa por tipo de edifício, sendo A – E1. Edifícios com outros elementos resistentes (madeira, metal); B – E2. Edifícios com pedra de adobe ou taipa; C – E3. Edifícios com paredes de alvenaria argamassada (sem placa); D – E3. Edifícios com paredes de alvenaria argamassada (com placa); E – E4. Edifícios com elementos resistentes de betão. Fonte dados: INE (março de 2019).

Elementos expostos (estradas e edifícios) afetados por movimentos de vertente na bacia do Rio Grande da Pipa

A partir do inventário referido na secção 3.2, que reporta a localização dos movimentos de vertente por tipo deslizamento que afetaram estradas e edifícios, sustentado por registos de campo, é possível observar que na área de estudo (Tabela 3.4), a maior parte das ocorrências que geraram danos, ocorreram em estradas municipais (156 casos) e estradas nacionais (68 casos). Nas estradas rurais e caminhos registaram-se 56 ocorrências e apenas em 18 casos os deslizamentos afetaram troços da autoestrada. De salientar, que a mesma estrada poderá ser afetada em vários troços (partes da estrada). Relativamente ao número de registos de danos em edifícios, verifica-se que este é substancialmente menor do que no caso das estradas, a maior parte dos movimentos de vertente que geraram danos afetaram edifícios de pedra de adobe ou taipa (17 registos), seguidos pelos edifícios com paredes de alvenaria argamassada e por edifícios com elementos resistentes de betão, 14 e 10 casos, respetivamente. Por último, apenas foi registado um caso de edifício com outros elementos resistentes (madeira, metal) afetado.

Tabela 3.4 - Distribuição de troços de estradas e edifícios, por tipologia de construção, afetados por movimentos de vertente na bacia do RGP.

Estradas	Nº de (troços) estradas com danos		Edifícios	Nº de edifícios com danos
V4 – Autoestrada	18		E4 -Edifícios com elementos resistentes de betão	10
V3 – Estrada nacional	68		E3 - Edifícios com paredes de alvenaria argamassada	14
V2 – Estrada asfaltada	156		E3 - Edifícios sem placa	
V1 – Estrada rural	56		E2 - Edifícios com pedra de adobe ou taipa	17
V1a - Caminho	54		E1 - Edifícios com outros elementos resistentes (madeira, metal)	1
TOTAL	352		TOTAL	42

Propositadamente deixado em branco

CAPÍTULO 4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para determinar o grau de perda (vulnerabilidade física) de um elemento exposto em função do impacto exercido por um movimento de vertente e o grau de perda potencial do conjunto de elementos expostos em função da suscetibilidade a movimentos de vertente do tipo deslizamento na bacia do Rio Grande da Pipa é apresentada esquematicamente na Figura 4.1.

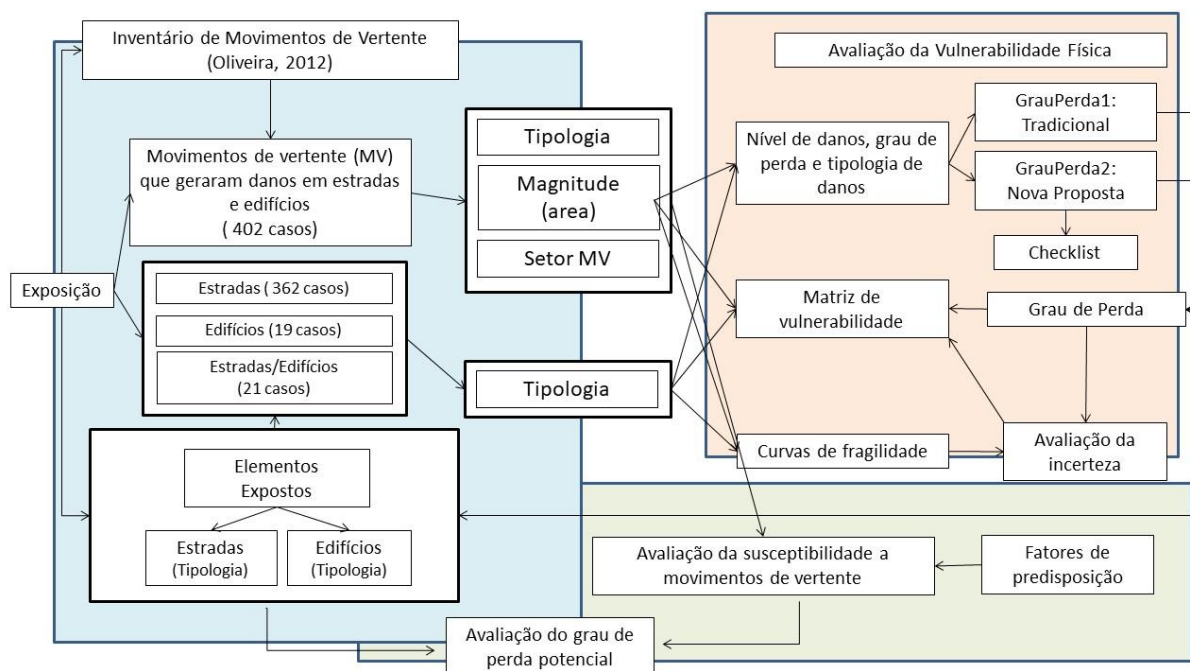


Figura 4.1 - Esquema metodológico para a avaliação da vulnerabilidade física e perdas potenciais de estradas e edifícios a movimentos de vertente do tipo deslizamento.

Numa perspetiva mais tradicional, tem sido utilizada na região norte de Lisboa um conjunto de critérios, essencialmente qualitativos, para determinar o grau de perda de estradas e edifícios afetados por movimentos de vertente (Garcia, 2012; Guillard e Zêzere, 2012; Guillard-Gonçalves *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2016). Estes critérios mais qualitativos (abordagem GrauPerda1) são por essa razão mais subjetivos no momento de avaliação do grau de perda. Neste trabalho é apresentada uma nova proposta (GrauPerda2), em que a abordagem utilizada para avaliar a vulnerabilidade física assenta essencialmente num conjunto de critérios mensuráveis e marcadores únicos de deformação que permitam avaliar de forma mais objetiva o grau de perda em estradas e edifícios quando afetadas/os por um movimento de vertente de uma determinada magnitude.

Para efeitos de validação da presente proposta, é confrontado, caso a caso, o grau de perda determinado a partir dos critérios mais subjetivos da abordagem GrauPerda1 com o grau de perda determinado a partir dos critérios mais objetivos definidos na abordagem GrauPerda2. Posteriormente, com base na proposta GrauPerda2, são definidas *checklists* de indicadores que permitam determinar o grau de perda de estradas e edifícios e são definidas as respetivas matrizes de vulnerabilidade e curvas de fragilidade. Numa última etapa é avaliada a exposição de diferentes tipos de estradas e edifícios à ocorrência de movimentos de vertente e avaliado o grau de perda potencial tendo por base a distribuição espacial dos elementos expostos e a suscetibilidade da área de estudo à ocorrência de movimentos de vertente de determinada magnitude.

4.1. GRAU DE PERDA E TIPOLOGIA DE DANOS EM EDIFÍCIOS E ESTRADAS

4.1.1. ABORDAGEM GRAUPERDA1

A dificuldade em quantificar o grau de perda de um elemento exposto em função do impacto exercido por um movimento de vertente, tem sido associada, por um lado à complexidade em avaliar em que medida um elemento é afetado estruturalmente, e por outro à dificuldade em estabelecer efetivamente a perda de um determinado elemento com base em custos de reconstrução (Cardinali *et al.*, 2002; Bonachea *et al.*, 2004; Reichenbach *et al.*, 2005; Sterlacchini *et al.*, 2007).

Como forma de ultrapassar este problema na avaliação da vulnerabilidade física, a determinação do grau de perda (nível de danos) estabelecido qualitativamente em função de diferentes tipologias de danos em elementos expostos (estradas e edifícios) tem sido utilizada internacionalmente (Fell *et al.*, 2005; Papathoma-Köhle *et al.*, 2007; Uzzieli *et al.*, 2008; Sterlacchini *et al.*, 2014) e utilizada com sucesso na região norte de Lisboa (Garcia, 2012; Guillard e Zêzere, 2012; Guillard-Gonçalves *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2016). As descrições qualitativas das diferentes tipologias de danos são agrupadas em cinco classes de nível de danos e variam entre danos negligenciáveis (Nível de danos D1, Grau de perda 0 - 0,2) e danos muito severos (Nível de danos D5, grau de perda 0,8 -1) (Tabela 4.1). Esta abordagem

qualitativa da avaliação da vulnerabilidade física (Tabela 4.1) será referenciada neste trabalho como “GrauPerda1”.

A matriz de danos GrauPerda1 foi ajustada por Oliveira *et al.* (2016) a partir de trabalhos anteriores de referência regional (Garcia, 2012; Guillard-Gonçalves *et al.*, 2015). Desta forma é possibilitada a determinação do grau de perda sofrido por elementos expostos em função de danos gerados por movimentos de vertente, quer quando afetados apenas por situações de rotura dos terrenos, quer quando afetados por situações de acumulação de material (*e.g.*, Mavrouli *et al.*, 2014; Sterlacchini *et al.*, 2014; Papathoma-Köhle *et al.*, 2016). Nestes últimos, é assumido que o depósito do movimento de vertente, em função do volume do material mobilizado e da velocidade de deslocação, pode condicionar o grau de perda/nível de danos sofrido pelos elementos expostos (Laetiltin *et al.*, 2005; Mavrouli *et al.*, 2014). No caso dos movimentos de vertente do tipo deslizamento que ocorrem na região norte de Lisboa a velocidade de deformação é tipicamente baixa, mas o volume da massa mobilizada pode ser elevado e dessa forma originar danos consideráveis (Guillard e Zêzere, 2012). Oliveira *et al.* (2016) propõem ainda no caso das estradas que a determinação do grau de perda (nível de dano) seja igualmente considerada nos casos em que os movimentos de vertente ocorram apenas no talude inferior que constitui o suporte lateral à berma da estrada (parte da estrada potencialmente construída sobre aterro). Neste caso em particular, o grau de perda máximo de 0,6 determinado pelos autores parece estar relacionado com diminuição da resistência por remoção parcial/total do suporte lateral da estrada o que pode originar por efeitos de descompressão lateral e por efeitos de carga no piso de rodagem, sérios condicionamentos à sua utilização (perda de funcionalidade). A perda de funcionalidade resulta então da necessidade da circulação apenas se poder fazer de forma alternada na faixa de rodagem mais afastada do talude inferior ou mesmo pela potencial necessidade de corte temporário ou permanente da estrada.

Tabela 4.1 - Abordagem GrauPerda1 - Grau de perda, nível e tipologia de danos em edifícios e estradas (adaptado de Oliveira *et al.*, 2016).

Nível de danos	Tipologia de danos			
	Edifícios		Estradas	
	Situação de rotura ou deformação	Situação de soterramento	Situação de rotura ou deformação	Situação de soterramento
D1 Negligenciável Danos estéticos [0; 0,2]	Deformação superficial de cobertura (reboco), fissuras sem abertura ou desnível lateral.	Acumulação de material até 0,5m de altura.	Pequena deformação do pavimento; fendas de tração sem deslocamento vertical. Não afeta a estrutura.	Acumulação de material <0,5m. Praticamente não interrompe a circulação.
D2 Ligeiro Danos menores [0,2; 0,4]	Queda de estuque, fissuras pequenas ou com desnível lateral, danos em portas e janelas.	Acumulação de material entre 0,5m e 2m de altura.	Pequenas fraturas com desnível, deformação da via. Danos que afetam a estrutura mas não impedem a circulação.	Acumulação de material entre 0,5m e 2m. Interrupção da circulação de média duração.
D3 Significativo Danos importantes / estruturais [0,4; 0,6]	Deslocamento ou colapso parcial de paredes ou painéis. Não compromete a integridade estrutural, fissuras muito desenvolvidas. Reparação complexa.	Acumulação de material com altura superior a 2m.	Fraturas ou deformações que danificam a estrutura da via. Restabelecimento da circulação relativamente expedito. Roturas a afetar apenas a berma da estrada.	Acumulação de material >2m. Interrupção da circulação de longa duração.
D4 Severo Danos estruturais [0,6; 0,8]	Deslocamento ou colapso de alvenarias, queda parcial de pisos, fissuração grave ou colapso de secções da estrutura devido a assentamentos. Pode afetar a estabilidade do edifício.	(a)	Danos que afetam gravemente parte da via (fraturas, abatimentos, deformação do piso). O restabelecimento total da circulação só é possível mediante intervenção complexa e demorada. Pode originar o abandono da via ou circulação alternada.	(a)
D5 Muito Severo Danos estruturais [0,8; 1]	Danos que comprometem gravemente a integridade estrutural: colapso parcial ou total do edifício. Inclinação do edifício impeditiva da sua funcionalidade.	(a)	Danos que afetam gravemente a totalidade da via (fraturas, abatimentos, deformação do piso). O restabelecimento da circulação só é possível mediante intervenção complexa e demorada. Pode originar o abandono da via.	(a)

(a) Tipologia de danos não definida.

4.1.2. ABORDAGEM GRAUPERDA2

A proposta GrauPerda2 tem como objetivo fundamental a diminuição de alguma ambiguidade que possa existir na avaliação qualitativa da vulnerabilidade física expressa pela abordagem GrauPerda1. Em particular, pela subjetividade que pode existir na determinação do grau de perda por técnicos com diferentes níveis de especialização. Com a presente proposta (GrauPerda2) pretende-se definir um conjunto de critérios mensuráveis e marcadores únicos de deformação que permitam avaliar mais objetivamente o grau de perda em estradas e edifícios, quando afetadas/os por movimentos de vertente. A presente proposta contempla uma diferenciação em dez classes de grau de perda/nível de danos ajustados a um intervalo de classe de 0,1. Tenta-se desta forma diminuir a sobrevalorização/subvalorização que a avaliação da vulnerabilidade (grau de perda potencial) feita pela utilização da abordagem GrauPerda1 (nível de danos estabelecido em função de um intervalo de classe de 0,2) possa ter na análise de risco. A proposta GrauPerda2 não pretende uma rotura com as relações entre nível de danos e tipologia de danos em uso (*e.g.*, Garcia, 2012; Guillard-Gonçalves *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2016), mas sim um ajuste e uma maior discriminação do grau de perda relativamente às propostas pré-existentes (abordagem GrauPerda1). O grau de perda dos elementos expostos na área de estudo determinados pela abordagem GrauPerda1 será posteriormente comparado, caso a caso, com o grau de perda determinado pela abordagem “GrauPerda2” que utiliza critérios menos subjetivos para a determinação do grau de perda e que será descrita adiante ao longo das diferentes subsecções do ponto 4.1.2.

4.1.2.1. CRITÉRIOS PARA A DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE DANOS, GRAU DE PERDA E TIPOLOGIA DE DANOS EM ESTRADAS

Na proposta GrauPerda2 os critérios que foram alvo de quantificação ou os elementos que passaram a corresponder a marcadores únicos de deformação/perda de funcionalidade para a determinação do grau de perda de estradas em função da tipologia de danos sofridos são: (i) a abertura de fissuras/fendas de tração no pavimento da via; (ii) o desnível vertical de fraturas no pavimento da via (iii) a amplitude de ondulação do pavimento da via; (iv) o tempo de interrupção/condicionamento da circulação; (v) a perda de resistência do suporte lateral da estrada em aterro e (vi) acumulação de material.

Os critérios de deformação vertical e horizontal foram ajustados ao que se assumiu no presente trabalho ser a capacidade que um veículo automóvel ligeiro de passageiros tem em ultrapassar um determinado obstáculo, não contemplando para o efeito a velocidade de circulação.

(i) abertura de fissuras/fendas de tração no pavimento da via;

Os critérios adotados para determinar o grau de perda associado à deformação horizontal registada em estradas, independentemente do tipo de estrada, são expressos pela abertura de fissuras/fendas de tração no pavimento das vias. Foram adotados os seguintes valores de referência: <1 cm com um grau de perda associado a 0,2; [1 a 5 cm] com grau de perda associado a 0,3;]5 a 10 cm] com grau de perda associado a 0,4;]10 a 30 cm [com grau de perda associado a 0,5, 0,6; e ≥ 30 cm com grau de perda de 0,7 a 0,9, o grau perda de 1 neste parâmetro não foi aplicado.

Para fraturas no pavimento da via com abertura até 10 cm (Figura 4.2A e 4.2B) são assumidos danos ligeiros e não é esperado a interrupção da circulação de veículo. Se a abertura de fraturas se situar entre 10 e 30 cm (Figura 4.2C) a circulação de veículos pode ocorrer de forma condicionada ou mesmo ser impossibilitada. Nos casos onde as fraturas no pavimento da via excederam os 30 cm (Figura 4.2C) a circulação automóvel foi interrompida, atestando dessa forma, a existência de problemas estruturais graves que comprometem a funcionalidade da estrada.



Figura 4.2 - Abertura de fissuras/fraturas a afetar o pavimento e a estrutura da estrada. A) fendas com abertura até 5 cm; B) fendas com abertura entre 5 e 10 cm; C) fendas com abertura até 30 cm (topo da fotografia) e maior que 30 cm (base da fotografia).

Na Figura 4.3 é apresentado esquematicamente o efeito da passagem de um veículo de ligeiros de passageiros com um pneu de 64 cm de diâmetro do modelo de automóveis mais vendido no primeiro semestre de 2018 (Renault Clio – Fonte: ACAP - Associação Automóvel de Portugal), não contemplando a velocidade de circulação, como fator adicional para a passagem do obstáculo. O que se verifica é que para uma abertura mínima de 30 cm a plataforma do veículo aproximar-se-á cerca de 4 cm do piso da via (não contempla a inclinação do veículo no momento em que a roda dianteira entra na fenda de tração) o que face à distância máxima ao solo que estes veículos apresentam (10-12 cm) podem condicionar seriamente a circulação (*e.g.*, Santos, 1997; Cavalheiro e Leite, 2001). A situação é agravada com abertura das fraturas >30 cm. O grau de perda associado à deformação horizontal terá de contemplar o desnível vertical (que será falado no próximo parâmetro), ainda assim neste parâmetro apenas foram consideradas fendas profundas em situações de translação (não contempla desnível vertical de blocos de estrada por abatimento).

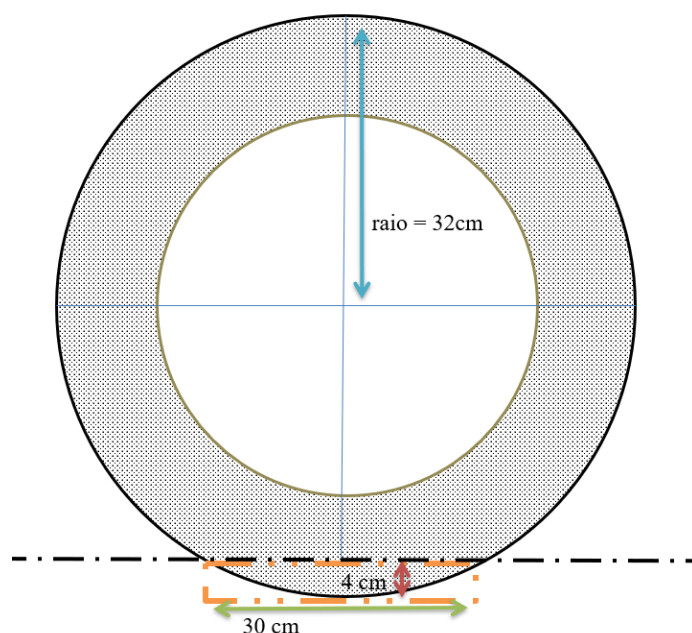


Figura 4.3 - Exemplo de possível condicionamento à circulação gerado por fenda no pavimento da via com 30 cm de abertura.

(ii) o desnível vertical de fraturas; (iii) a amplitude de ondulação do pavimento da via;

No caso do desnível vertical registado em fraturas ao longo da estrada e ondulação do pavimento da via adotaram-se os mesmos valores de referência associado ao mesmo grau de perda utilizados em (i): <1 cm; [1 a 5 cm];]5 a 10 cm];]10 a 30 cm]; e ≥ 30 cm (Figura 4.4).

Estes valores ajustam-se com grande razoabilidade aos valores de desnível vertical definidos nas normas de construção para a altura padrão dos lancis localizados nas bermas das estradas (*e.g.*, Regulamento da Urbanização e Edificação do Município de Cascais n.º 78-2013, Artigo 41.º 1 a) e para a altura dos separadores centrais das vias (> 30 cm, altura aproximada à dos lancis de segurança). O limite de deformação vertical de 10 cm é utilizado neste trabalho como referência para um obstáculo vertical que pode ser ultrapassado por um veículo em circulação (veículo ligeiro de passageiros), mas implica, regra geral, uma diminuição substancial da velocidade de circulação. Acima deste desnível alguns autores assumem que um carro não conseguirá ultrapassar o obstáculo (*e.g.*, CROW, 1998). No caso do limite definido pelo desnível vertical de 30 cm, ele foi adotado de forma a fixar o desnível vertical máximo, a partir do qual, independentemente do tipo de pavimento de via, um veículo ligeiro de passageiros em circulação não consegue ultrapassar o obstáculo. Este valor é sustentado ainda pela altura que alguns lancis que ladeiam ilhas de peões ou separadores centrais de faixas de circulação têm, como forma de impedir a transposição entre faixas de rodagem em estradas de dois sentidos ou de forma a impedir o estacionamento em cima dos passeios (Figura 4.5).

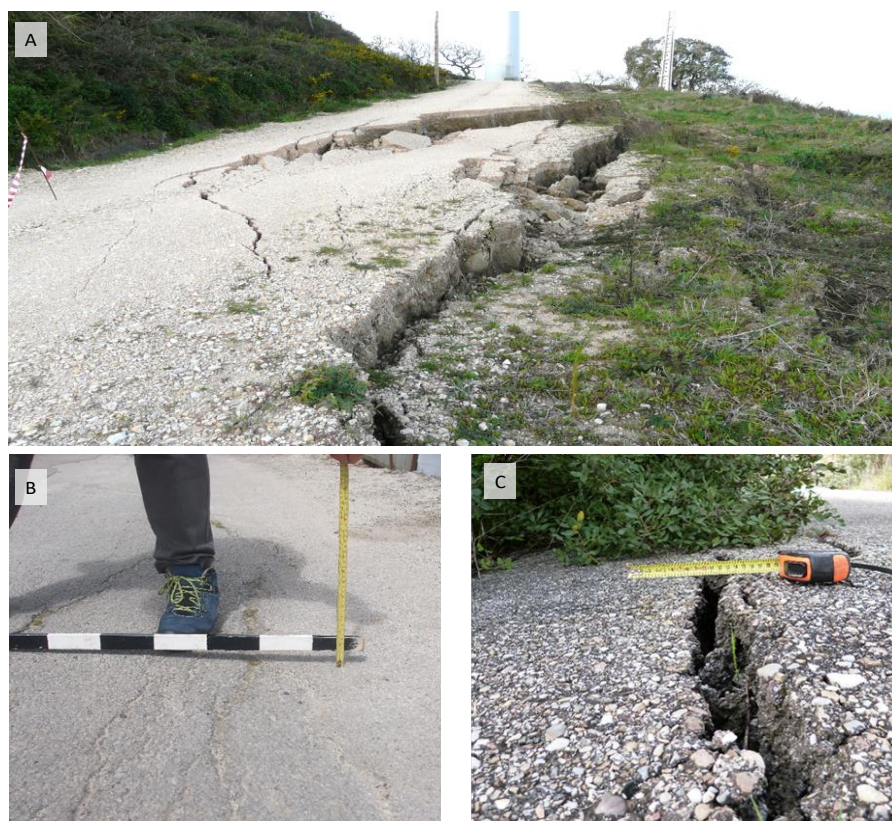


Figura 4.4 - Desnível vertical de fraturas registado em estradas. A) estrada de terra batida com desnível vertical máximo das fraturas superior a 30 cm; B) desnível vertical até 5 cm com ondulação do pavimento da via; C) desnível vertical até 5 cm sem ondulação do pavimento da via.



Figura 4.5 - Separador de via não galgável/ lancil de segurança com aproximadamente 30 cm de altura em Lisboa (Av. Professor Egas Moniz). Imagem: Google Earth consultada em 20/06/2018.

Nos casos em que não existiam indicações precisas da deformação vertical do piso da via, nos registos de campo do inventário de movimentos de vertente obtido por Oliveira (2012), foi realizado trabalho de campo suplementar, para suprimir as lacunas da base de dados. Quando através do trabalho de campo se verificou que as marcas de deformação vertical já não se encontravam visíveis, principalmente devido a trabalhos de restauro do piso da via, utilizaram-se registos indiretos de deformação para inferir o valor de deformação vertical ocorrido nesse período. Para o efeito foi tido em consideração: (i) o tipo de camada da estrada restaurado (Figura 4.7), (ii) o número de camadas de estrada restauradas; e (iii) a espessura de cada camada de estrada em função do tipo de estrada (Figura 4.6, Tabela 4.2).

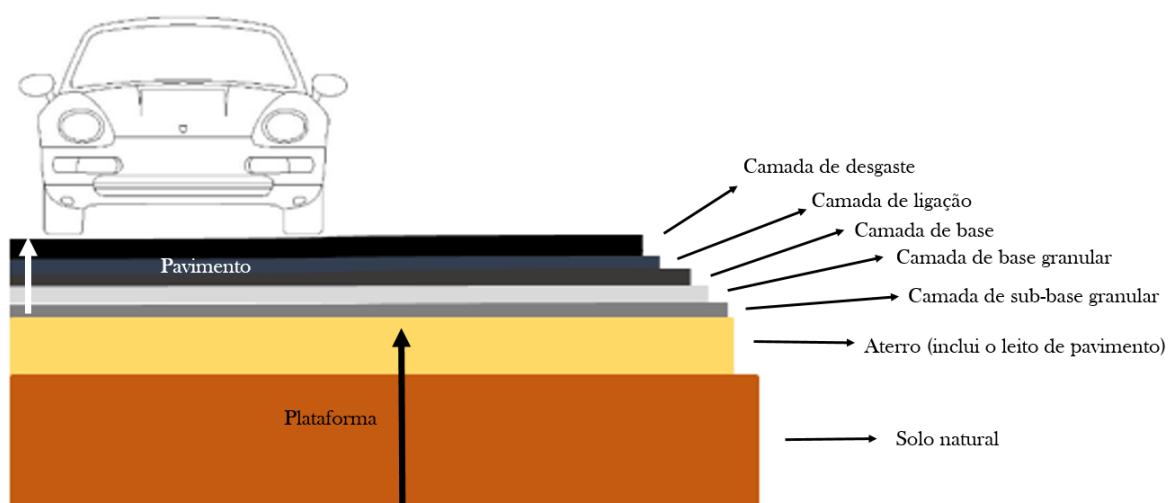


Figura 4.6 - Estrutura geral do pavimento rodoviário - Tipo de camadas da estrada. Adaptado do Instituto de Infraestruturas rodoviárias. Fonte: Estradas de Portugal, 2009 – Pavimentação.

Tabela 4.2 - Estrutura geral do pavimento rodoviário por tipo de estrada. Adaptado do Instituto de Infraestruturas rodoviárias. Fonte: Estradas de Portugal, 2009 – Pavimentação.

Camada \ Tipo de estrada	Tipo material	Autoestrada (V4)	Estrada Nacional (V3)	Estrada Municipal ou similar asfaltada (V2)	Estrada rural, terra (V1)	Caminho (V1a)
Desgaste	Asfalto/ Betão	5 cm				
Ligação	Asfalto/ Betão	8 cm				
Base	Macadames/misturas betuminosas	15 cm				
Base granular	Material natural ou britado	15 cm				
Sub-base granular	Britado ou solo-cimento	15 cm a 25 cm				
Aterro	Britado ou cimento					
Solo natural	Solo natural					

Dando como exemplo uma estrada municipal que tipicamente apresenta apenas uma camada de desgaste, asfaltada, sobre a base granular (espessura = 5 cm) - se após o restauro de um determinado setor dessa estrada municipal afetado por um movimento de vertente se verifica que existem sobrepostas duas camadas de desgaste ou que a camada de desgaste apresenta uma espessura maior do que a determinada em projeto (valores de referência utilizados, ver Tabela 4.2), por exemplo, se foi medida uma espessura de 10 cm, então o que foi assumido no presente trabalho foi que o abatimento do piso nesse local terá sido na ordem dos 5 cm (Figura 4.7). Isto é, a partir do número de camadas de asfalto ou da sua espessura nos segmentos de estrada restaurados, foi possível a partir destes indicadores, inferir qual a deformação vertical registada no pavimento da via no passado (Figura 4.8).

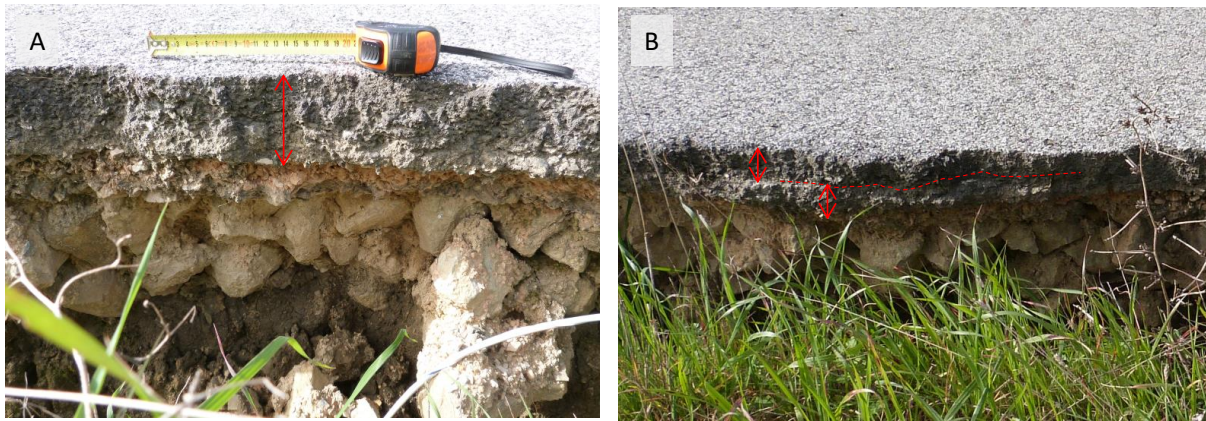


Figura 4.7- (A) Abatimento do piso inferido a partir da espessura da camada de desgaste (B) e a partir da existência do número de camadas de desgaste.



Figura 4.8 – Exemplo de segmento de estrada (estrada da Mata) deformado por um movimento de vertente e com evidências de posterior restauro e deformação pós-restauro.

No caso da ondulação do pavimento assume-se o critério altura da deformação curvilínea/ondulatória no pavimento da via (parâmetro a, Figura 4.9). Até 10 cm de ondulação (a) assume-se apenas um ligeiro constrangimento à circulação associado a um grau de perda de 0,1 a 0,3 caso seja <5 cm e de [5 a 10 cm]. Se a altura das deformações se situarem entre os 10 e 30 cm (Figura 4.10) assume-se que esta é suficiente para condicionar moderada a fortemente a velocidade de circulação associado a um grau de perda de 0,5; 0,6. Para ondulação do pavimento da via com altura acima de 30 cm assume-se que esta impede o obstáculo de ser ultrapassado 0,7 a 0,9. O que se tem verificado, quer na área de estudo, quer

noutras regiões da orla mesocenozóica com semelhante contexto geológico e o mesmo tipo de movimentos de vertente (Figura 4.10C), é que nas situações em que a altura da ondulação no pavimento da via foi superior a 30 cm a circulação automóvel foi cortada. Estes valores, ajustam-se também de certa forma à altura das lombas redutoras de velocidade. A DGV (2004) recomenda que as lombas (circulares) devem ter 3,7 m de comprimento e altura compreendida entre 7,5 e os 10 cm no seu ponto central.

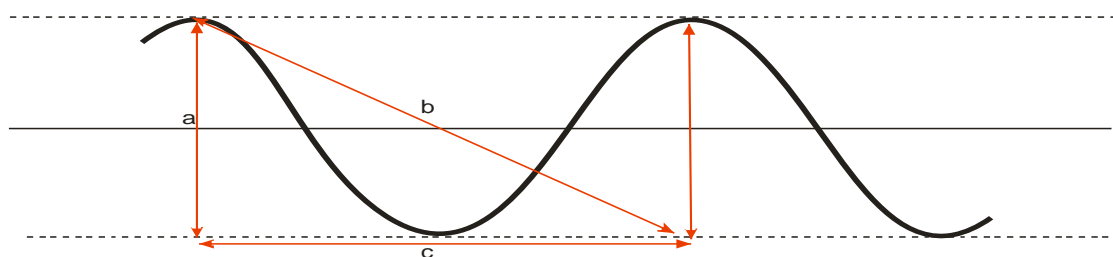


Figura 4.9 – Parâmetros considerados para descrever a geometria da deformação ondulatória do pavimento da via. a) altura; b) declive e c) comprimento de onda.



Figura 4.10 - Deformação curvilínea (ondulação) do pavimento da via. A) Ondulação do pavimento inferior a 10 cm; B) ondulação do pavimento entre 10-30 cm; C) ondulação do pavimento superior a 30 cm.

(iv) o tempo de interrupção/condicionamento da circulação;

Os critérios que servem de base à avaliação do grau de perda em função do tempo de interrupção/ condicionamento da circulação originado por um movimento de vertente têm sido inferidos principalmente a partir da avaliação de custos indiretos, particularmente os que advêm da perda de produtividade, pelo facto das pessoas aumentarem o tempo de circulação em função de terem que utilizar rotas alternativas às que utilizavam (*e.g.*, casa-trabalho ou distribuição de mercadorias) após essas vias (estradas) serem interrompidas ou serem condicionada a circulação pela ocorrência de movimentos de vertente (*e.g.*, MacLeod *et al.*, 2005; Garcia, 2012). Desta forma é assumido na proposta GrauPerda2 que quanto maior for o tempo de interrupção/condicionamento da circulação maior será o grau de perda, fruto da maior complexidade em recuperar o elemento afetado, afastando outros cenários como por exemplo a falta de verbas para reparação da mesma. Para além da perda de produtividade por via do aumento do tempo de deslocação, os custos indiretos implicam igualmente a contabilização do consumo adicional de combustíveis e outros tipos de perdas económicas como sejam eventuais gastos adicionais em portagens (Zêzere *et al.*, 2007; Winter *et al.*, 2016). A título de exemplo, salienta-se a situação por resolver desde dezembro de 2016 na via que fazia a ligação de 12 km entre Pomarão (Concelho de Mértola, Portugal) e El Granado (Província de Huelva, Espanha), um movimento de vertente que obrigou ao fecho da via para a remoção do depósito de material deslizado e esta ligação passou para mais de 100 quilómetros, com repercussões enormes no comércio e turismo de ambos os lados da fronteira (custos indiretos) (Figura 4.11).

Assim, neste sentido, na proposta GrauPerda2 foram considerados os seguintes limites temporais relacionados com a interrupção/condicionamento da circulação e respetivos graus de perda: (i) inferior a um dia (0,1 de grau de perda); (ii) inferior a 3 dias (0,2 de grau de perda); (iii) inferior a 5 dias (0,3 de grau de perda); (iv) inferior a 10 dias (0,4 de grau de perda); (v) inferior a 15 dias (0,5 de grau de perda); (vi) inferior ou igual a 30 dias (1 mês de trabalho) (grau de perda de 0,6); (vii) 1 mês a 3 meses (grau de perda de 0,7); (viii) 6 meses e 1 ano (grau de perda - 0,8 e 0,9, respetivamente); e (ix) superior a 1 ano (grau de perda total - 1). Assume-se claramente com esta proposta que para situações de interrupção da circulação de longa duração, particularmente quando superior a 6 meses, que o grau de perda deve ser elevado e que envolverá problemas severos de estabilidade da via.

Celebrar o rio Guadiana, valorizar o seu peixe e conseguir uma mais-valia económica para os empresários locais são os grandes objetivos que norteiam a realização do Festival do Peixe do Rio, que decorre entre este fim de semana em Pomarão, concelho de Mértola.

Organizado pela Câmara Municipal da "Vila Museu", a edição de 2017 viu reduzida a presença de visitantes estrangeiros vindos de Espanha (El Granado, Puebla de Guzman, Villanueva de los Castillejos, El Almendro e Tharsis, localidades próximas da fronteira), já que desde há quatro meses que a ligação entre os dois países está interrompida a cerca de 100 metros do tabuleiro da Ponte Internacional do Baixo Guadiana. Um deslizamento de terras na HU-6400, do lado de "nuestros hermanos", arrastou para a rodovia várias toneladas de pedras e terra, que barraram aquela via por completo.

Figura 4.11 – Notícia que reporta custos indiretos no comércio e turismo devido a interrupção de estrada por um movimento de vertente - caso do Festival do Peixe do Rio.
Fonte: Jornal de Noticias (2018), página visitada no dia 20/06/2018.

(v) a perda de resistência do suporte lateral da estrada em aterro;

Relativamente aos movimentos que ocorrem apenas no talude inferior que constitui o suporte lateral à berma das estradas construídas parcialmente ou totalmente sobre aterro optou-se por não considerar, de uma forma generalizada, o valor de 0,6 de grau de perda como definido em Oliveira *et al.* (2016), mas sim ajustar esse valor em função: (i) da altura do talude inferior da estrada em aterro e (ii) da posição que a cicatriz principal do movimento de vertente ocupa no talude.

O grau de perda assumido em função de roturas que possam ocorrer no talude inferior da estrada, que atua como muro suporte lateral de proteção, foi definido de acordo com os seguintes critérios:

- (i) Grau de perda = 0,2 – a rotura originada pelo movimento de vertente está localizada na área definida pelos 25 % da altura do talude contados a partir da via (1/4 superior do talude);
- (ii) Grau de perda = 0,3 – o movimento de vertente afeta até 50 % da altura do talude contado a partir da via (1/2 superior do talude);
- (iii) Grau de perda = 0,4 – o movimento de vertente afeta mais de 50 % da altura do talude contado a partir da via (Figura 4.12A).

Nas situações em que o movimento de vertente ocorrido no talude da estrada origina algum tipo de deformação no piso da faixa de rodagem, tipicamente abatimento do piso ou fendas de tração por falta de suporte lateral, acrescentou-se aos valores de referência definidos anteriormente mais 0,1 de grau de perda (Figura 4.12B). Isto é, se um deslizamento ocorre na metade superior do talude, afetando até 50% da sua altura e origina em simultâneo um abatimento do piso da faixa de rodagem, será classificado com um grau de perda final de 0,4 ($0,3 + 0,1$). Nos casos dos movimentos de vertente que apenas afetam o quarto inferior do talude considerou-se que o grau de perda não excede 0,1.



Figura 4.12 – Deslizamento em talude de estrada, A) grau de perda de 0,4; B) grau de perda de 0,5

(vi) acumulação de material;

Quanto à acumulação de material em situação de soterramento assumiu-se que se o depósito do deslizamento que impacta a estrada não tiver mais de 0,5 m de altura então o grau de perda situar-se-á entre 0,1 e 0,2. Se a altura do depósito tiver entre 0,5 e 2 m o grau de perda a

determinar oscilará entre 0,3 e 0,4. Por fim para depósitos de movimentos de vertente com altura superior a 2 m assume-se que o grau de perda pode variar entre 0,5 e 1.

Na Tabela 4.3 é apresentada a proposta final GrauPerda2 incorporando as interpretações dos critérios mensuráveis ou marcadores únicos de deformação definidos nesta seção. Nas figuras 4.13 e 4.14 são apresentados exemplos de cada nível de danos/grau de perda para situações de soterramento (acima de 0,6 o grau de perda é função do tempo de interrupção da circulação e não pelo aumento da altura do depósito do deslizamento) e de rotura, respetivamente.

Tabela 4.3 – Abordagem GrauPerda2 - Nível de danos, grau de perda e tipologia de danos em estradas (adaptado de Alexander, 1989; Garcia, 2012; Oliveira *et al.*, 2016).

Estradas			
Nível de danos	Grau de perda	Situação de rotura ou deformação	Situação de soterramento
D0	0	Não são observados danos.	Não aplicável.
D1 Negligenciável (danos estéticos) [0,1; 0,2]	0,1	Pequena deformação do pavimento (ondulação <5 cm). Ausência de fendas no pavimento.	Acumulação de material até 0,5 m de altura cobrindo até ao limite de 1 faixa de rodagem ou metade da via. Interrupção/condicionamento da circulação <1 dia. Sem danos visíveis.
	0,2	Pequena deformação do pavimento (ondulação <5 cm). Fraturas com desnível/abertura <1 cm.	Acumulação de material até 0,5 m de altura cobrindo mais do que 1 faixa de rodagem ou mais de metade da via. Interrupção/condicionamento da circulação <3 dias. Danos superficiais no pavimento: destruição vertical <1cm.
D2 Ligeiro (danos menores) [0,3; 0,4]	0,3	Fraturas com desnível/abertura entre 1 e 5 cm. Deformação do pavimento (ondulação/ basculamento <5 cm).	Acumulação de material entre 0,5 m e 2 m de altura cobrindo até ao limite de 1 faixa de rodagem ou metade da via. Interrupção/condicionamento da circulação <5 dias. Danos ligeiros no pavimento: destruição vertical <5cm.
	0,4	Fraturas com desnível/abertura entre 5 a 10 cm na via. Deformação do pavimento (ondulação/ basculamento 5-10 cm).	Acumulação de material entre 0,5m e 2m de altura cobrindo mais do que 1 faixa de rodagem ou mais de metade da via. Interrupção/condicionamento da circulação <10 dias. Danos moderados no pavimento: destruição vertical <10cm.
D3 Significativo (danos importantes/ estruturais) Reparação complexa. [0,5; 0,6]	0,5	Fraturas com desnível/abertura entre 10 a 30 cm. Deformação do pavimento (ondulação/ basculamento <30 cm). Fraturas ou deformações danificam 1 faixa de rodagem ou metade da via.	Acumulação de material superior a 2m de altura cobrindo até ao limite de 1 faixa de rodagem ou metade da via. Interrupção/condicionamento da circulação <15 dias. Danos importantes no pavimento (destruição vertical <30cm).
	0,6	Fraturas com desnível/abertura entre 10 a 30 cm. Deformação do pavimento (ondulação/ basculamento <30 cm). Fraturas ou deformações que danificam mais do que 1 faixa de rodagem ou mais de metade da via.	Acumulação de material superior a 2 m de altura cobrindo mais do que 1 faixa de rodagem ou mais de metade da via. Interrupção/condicionamento da circulação <30 dias. Danos importantes no pavimento: destruição vertical <30cm.

Tabela 4.3 (Continuação) – Abordagem GrauPerda2 - Nível de danos, grau de perda e tipologia de danos em estradas (adaptado de Alexander, 1989; Garcia, 2012; Oliveira et al., 2016).

Estradas			
Nível de danos	Grau de perda	Situação de rotura ou deformação	Situação de soterramento
D4 Severo Danos estruturais [0,7; 0,8]	0,7	Fraturas com desnível/abertura superior a 30 cm mas inferior a metade da altura da estrutura da estrada. Fraturas ou deformações danificam até ao limite de 1 faixa de rodagem ou metade da via.	Acumulação de material superior a 2 m de altura cobrindo mais do que 1 faixa de rodagem ou mais de metade da via. Interrupção/condicionamento da circulação <90 dias. Danos severos que afetam a estrutura da estrada: destruição vertical >30cm e inferior a metade da altura da estrutura da estrada.
	0,8	Fraturas com desnível/abertura superior a 30 cm mas inferior a metade da altura da estrutura da estrada. Fraturas ou deformações que danificam mais do que 1 faixa de rodagem ou mais de metade da via.	Acumulação de material superior a 2 m de altura cobrindo mais do que 1 faixa de rodagem ou mais de metade da via. Interrupção/condicionamento da circulação <6 meses. Danos severos que afetam a estrutura da estrada: destruição vertical >30cm e inferior a metade da altura da estrutura da estrada
D5 - [0,9; 1] Muito severo Danos estruturais que comprometem gravemente a integridade estrutural	0,9	Fraturas com desnível/abertura superior a 30 cm que danificam mais do que 1 faixa de rodagem ou mais de metade da via. Deformação vertical superior a metade da altura da estrutura da estrada. Poderá gerar o abandono da estrada.	Acumulação de material superior a 2 m de altura cobrindo mais do que 1 faixa de rodagem ou mais de metade da via. Interrupção/condicionamento da circulação <12 meses. Danos muito severos que afetam a estrutura da estrada: destruição vertical >30cm e superior a metade da altura da estrutura da estrada.
	1	Destrói por completo toda a estrutura da estrada: camadas de desgaste, granular e fundações/aterro.	Acumulação de material superior a 2 m de altura cobrindo mais do que 1 faixa de rodagem ou mais de metade da via. Interrupção/condicionamento da circulação >12 meses. Destrói por completo toda a estrutura da estrada: camadas de desgaste; granular; fundações/aterro; e estruturas de drenagem das águas pluviais.

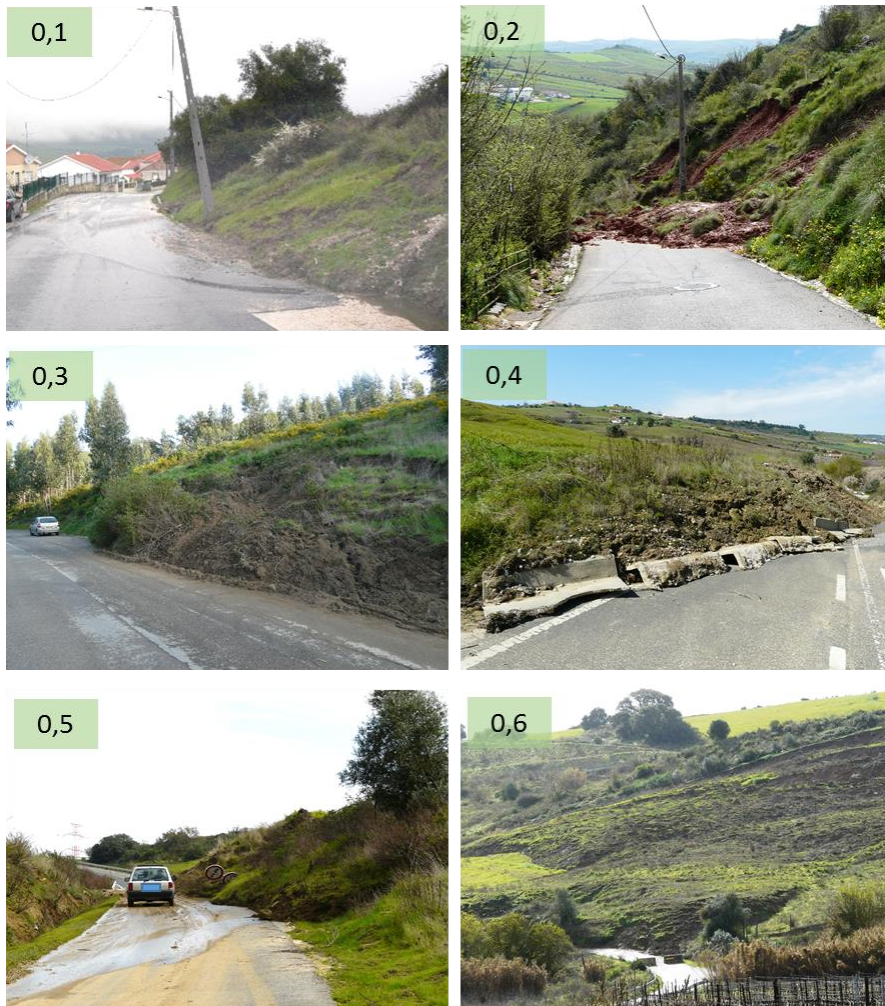


Figura 4.13 – Abordagem GrauPerda2 – Grau de perda entre 0,1 e 0,6 para situações de soterramento parcial ou total de estrada por depósito de deslizamento.



Figura 4.14 – Abordagem GrauPerda2 – Grau de perda entre 0,1 e 1 para situações de deformação ou rotura parcial ou total de estrada.

4.1.2.2. CRITÉRIOS PARA A DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE DANOS, GRAU DE PERDA E TIPOLOGIA DE DANOS EM EDIFÍCIOS

Para a determinação do nível de danos em edifícios, os critérios que foram alvo de quantificação ou os elementos que passaram a corresponder a marcadores únicos de deformação/perda de funcionalidade dos edifícios em função da tipologia de danos sofridos, no âmbito da proposta GrauPerda2, foram: (i) abertura e desnível lateral em fendas/ fraturas; (ii) acumulação de material; (iii) perda de funcionalidade. No caso dos edifícios o grau de perda final resulta da combinação do grau de perda definido pelos diferentes fatores, sendo que à semelhança das estradas, é o valor de grau de perda mais elevado determinado pelos diferentes fatores que determina o valor final de vulnerabilidade.

(i) Abertura e desnível lateral de fendas/fratura;

Os valores de abertura ou desnível lateral registado em fendas/fraturas em edifícios (Figura 4.15) a utilizar como referência na proposta GrauPerda2 foram sintetizados a partir da literatura (Baggio *et al.*, 2007, Martinelli *et al.*, 2008, Oliveira, 2016). Assim, assumiu-se que a abertura ou desnível lateral de fendas/fraturas (quanto maior a dimensão maior será a assunção do grau de perda) <1 mm corresponderá a 0,2 de grau de perda, para situações onde se verifique abertura ou desnível lateral de 1 a 10 mm corresponderá a 0,3 de grau de perda, entre 10 a 50 mm - 0,4 de grau de perda e por último, superior a 50 mm entre 0,5 a 1 de grau de perda.



Figura 4.15 - Fendas e fraturas com desnível lateral em paredes e elementos estruturais de edifícios.

(ii) Acumulação de material;

Um edifício poderá sofrer impactos por movimentos de vertente e os danos podem ser tanto funcionais como estéticos, e são função da sua intensidade (Uzielli *et al.*, 2008), da velocidade de deslocação da massa instabilizada (Jakob *et al.*, 2012; Sterlacchini *et al.*, 2014) ou da acumulação de material (Oliveira, 2016).

Na presente proposta assumiu-se que se o depósito do deslizamento que impacta o edifício não tiver mais de 0,5 m de altura então o grau de perda situar-se-á entre 0,1 e 0,2 (Figura 4.16). Se a altura do depósito tiver entre 0,5 e 2 m o grau de perda a determinar oscilará entre 0,3 e 0,4. Por fim para depósitos de movimentos de vertente com altura superior a 2 m assume-se que o grau de perda pode variar entre 0,5 e 1.



Figura 4.16 - Exemplo de impacto do depósito do movimento de vertente com altura inferior a 0,5 m na base de uma casa em construção em Alenquer (grau de perda entre 0,1 e 0,2)

(iii) Funcionalidade;

A funcionalidade de um edifício está intrinsecamente relacionada com a tipologia de danos e nesse sentido procurou-se identificar para cada fração decimal de grau de perda qual ou quais seriam os marcadores únicos de deformação que permitissem estabelecer a relação entre nível de danos (grau de perda) e perda de funcionalidade. Os valores de referência da proposta GrauPerda2 foram definidos a partir de literatura (Alexander, 2000; Glade, 2003; Baggio *et al.*, 2007, Mavrouli *et al.*, 2014; Guillard-Gonçalves *et al.*, 2015 e Oliveira, 2016) e encontram-se sistematizados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Grau de perda determinado a partir do nível de danos e perda de funcionalidade

Grau de perda	Danos e Funcionalidade
]0,1; 0,2]	Deformação superficial da cobertura
0,3	Danos ligeiros em portas e janelas (não impede totalmente a funcionalidade)
0,4	Danos graves em portas e janelas (afeta a sua funcionalidade).
0,5	Deslocamento parcial de paredes ou painéis do edifício. Não compromete a integridade estrutural (não afeta pilares, placas, outros elementos de resistência estrutural)
0,6	Colapso parcial de paredes ou painéis do edifício. Compromete a integridade estrutural, afeta ligeiramente pilares, placas, outros elementos de resistência estrutural
0,7	Deslocamento ou colapso de fachada do edifício. Colapso de secções da estrutura sem afetar a estabilidade do edifício
0,8	Deslocamento ou colapso de fachada ou painéis do edifício. Queda parcial de pisos, fissuração grave ou colapso de secções da estrutura. Pode afetar a estabilidade do edifício.
0,9	Colapso ou inclinação de parte do edifício. Afeta a estabilidade do edifício.
1	Colapso total do edifício. Inclinação do edifício. Impeditiva da sua funcionalidade

À semelhança do que foi apresentado na secção 4.1.2.1. na Tabela 4.5 são apresentadas as tipologias de danos para cada nível de danos (grau de perda), sustentados nos critérios definidos anteriormente nesta secção (4.1.2.2.).

Tabela 4.5 - Nível de danos, grau de perda e tipologia de danos em edifícios - abordagem GrauPerda 2 (adaptado de Alexander, 1989; Garcia, 2012; Oliveira *et al.*, 2016).

Edifícios			
Nível de danos	Grau de perda	Situação de rotura ou deformação	Situação de soterramento
D0	0	Não são observados danos	Não aplicável
D1 Negligenciável (danos estéticos) [0,1; 0,2]	0,1	Deformação superficial de cobertura (pintura + reboco)	Acumulação de material até 0,5m de altura. Deformação superficial de cobertura (pintura + reboco)
	0,2	Deformação superficial de cobertura (pintura + reboco). <u>Fissuras sem abertura ou desnível lateral (< 1mm)</u>	Acumulação de material até 0,5m de altura. Deformação superficial de cobertura (pintura + reboco). <u>Fissuras sem abertura ou desnível lateral (< 1mm)</u>
D2 Ligeiro (danos menores) [0,3; 0,4]	0,3	Queda de estuque/reboco. <u>Fendas com abertura ou desnível lateral (1 – 10 mm (a)). Danos ligeiros em portas e janelas (não impede totalmente a funcionalidade)</u>	Acumulação de material entre 0,5m e 2m de altura. <u>Queda de estuque/reboco. Fendas com abertura ou desnível lateral (1 – 10 mm). Danos ligeiros em portas e janelas (não impede totalmente a funcionalidade)</u>
	0,4	Queda de estuque/reboco. <u>Fendas com abertura ou desnível lateral (10-50 mm).</u> Danos graves em portas e janelas (afeta a sua funcionalidade).	Acumulação de material entre 0,5m e 2m de altura. Queda de estuque/reboco <u>Fendas com abertura ou desnível lateral (10-50 mm). Danos graves em portas e janelas (afeta a sua funcionalidade).</u>
D3 Significativo (danos importantes/ estruturais) Reparação complexa. [0,5; 0,6]	0,5	<u>Deslocamento parcial de paredes ou painéis do edifício.</u> <u>Não compromete a integridade estrutural (não afeta pilares, placas, outros elementos de resistência estrutural)</u> <u>Fendas muito desenvolvidas com abertura ou desnível lateral (> 50 mm).</u>	<u>Acumulação de material com altura superior a 2m.</u> <u>Deslocamento parcial de paredes ou painéis do edifício. Não compromete a integridade estrutural (não afeta pilares, placas, outros elementos de resistência estrutural). Fendas muito desenvolvidas com abertura ou desnível lateral (> 50 mm).</u>
	0,6	<u>Colapso parcial de paredes ou painéis do edifício.</u> Compromete a integridade estrutural. Fendas muito desenvolvidas (> 50mm) <u>Afeta ligeiramente pilares, placas, outros elementos de resistência estrutural</u>	<u>Acumulação de material com altura superior a 2m.</u> <u>Colapso parcial de paredes ou painéis do edifício.</u> <u>Compromete a integridade estrutural. Fendas muito desenvolvidas (> 50mm)</u> <u>Afeta ligeiramente pilares, placas, outros elementos de resistência estrutural</u>
	0,7	<u>Deslocamento ou colapso de fachada do edifício</u> <u>Colapso de secções da estrutura sem afetar a estabilidade do edifício</u>	<u>Acumulação de material com altura superior a 2m.</u> <u>Deslocamento ou colapso de fachada ou painéis do edifício</u> <u>Colapso de secções da estrutura sem afetar a estabilidade do edifício</u>
D4 Severo (Danos estruturais) [0,7; 0,8]	0,8	Deslocamento ou colapso de fachada ou painéis do edifício. <u>Queda parcial de pisos, fissuração grave ou colapso de secções da estrutura. Pode afetar a estabilidade do edifício.</u>	Acumulação de material com altura superior a 2m. Deslocamento ou colapso de fachada ou painéis do edifício. <u>Queda parcial de pisos, fissuração grave ou colapso de secções da estrutura. Pode afetar a estabilidade do edifício.</u>

Tabela 4.5 (Continuação) - Nível de danos, grau de perda e tipologia de danos em edifícios - abordagem GrauPerda 2 (adaptado de Alexander, 1989; Garcia, 2012; Oliveira *et al.*, 2016).

Edifícios			
Nível de danos	Grau de perda	Situação de rotura ou deformação	Situação de soterramento
D5 - Muito severo Danos estruturais que comprometem gravemente a integridade estrutural [0,9; 1]	0,9	Colapso ou inclinação de parte do edifício.	Acumulação de material com altura superior a 2m.
		Afeta a estabilidade do edifício.	Colapso ou Inclinação de parte do edifício. Permite a funcionalidade no setor do edifício não afetado
	1	Colapso total do edifício. Inclinação do edifício	Acumulação de material com altura superior a 2m.
		Impeditiva da sua funcionalidade	Colapso total do edifício. Inclinação do edifício Impeditiva da sua funcionalidade

4.2. FATORES CONDICIONANTES DA VULNERABILIDADE FÍSICA

A vulnerabilidade física expressa pelo grau de perda registado em estradas e edifícios afetados por movimentos de vertente é condicionada principalmente pela resistência estrutural do elemento, pela forma como o deslizamento impacta o elemento exposto, e pela magnitude dos movimentos de vertente (Leóne *et al.*, 1996; Uzielli *et al.*, 2008; Ciurean *et al.*, 2013).

(i) Tipologia de estradas e edifícios;

A resistência dos edifícios e das estradas está intrinsecamente relacionada com a tipologia de construção, e por essa via tem sido possível individualizar genericamente quatro categorias distintas de estradas e das estradas referidas na secção 3.4.

(ii) Tipologia de localização de estradas e edifícios em função dos diferentes setores internos dos deslizamentos;

Um outro fator que pode condicionar o grau de perda num elemento exposto está relacionado com a forma como este é afetado por um movimento de vertente (Fell e Hartford, 1997; Wong *et al.*, 1997; Cardinali *et al.*, 2002; Nathan, 2005). No caso da bacia do Rio Grande da Pipa e região norte de Lisboa de uma forma geral os deslizamentos surgem como o tipo

predominante de movimento de vertente. A seguinte tipologia de condições que expressam a forma como os diferentes setores dos movimentos de vertente do tipo deslizamento podem afetar estradas e edifícios são determinadas na Figura 4.17.

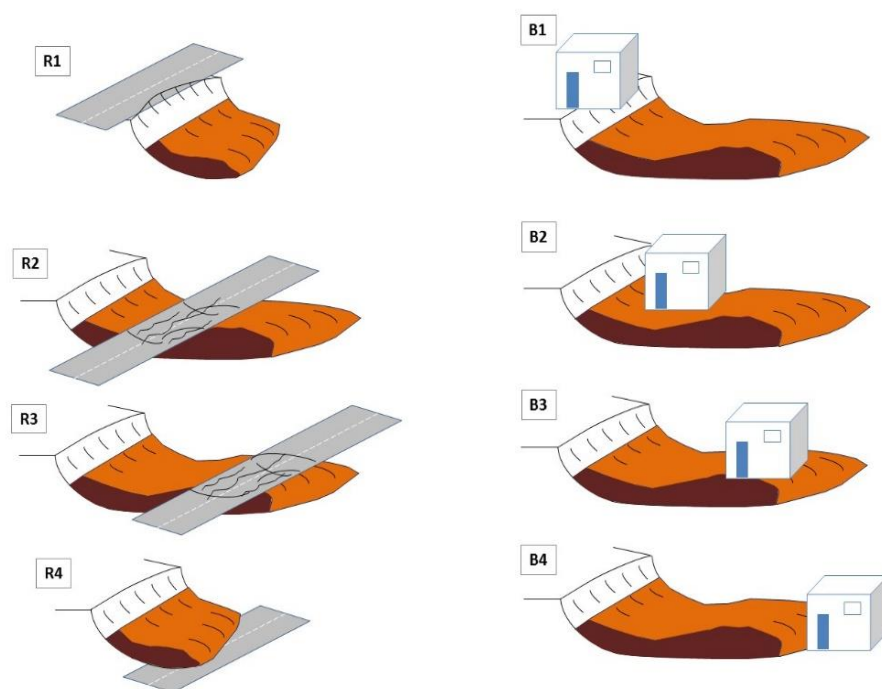


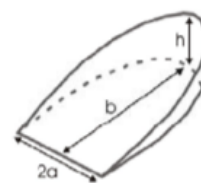
Figura 4.17 - Tipologia de localização de edifícios e estradas em função dos diferentes setores internos dos deslizamentos: cicatriz (B1, R1), área de depleção (B2, R2), área de acumulação (B3, R3), e frente do deslizamento (B4, R4). Fonte: Oliveira *et al.*, 2016.

(iii) Magnitude/intensidade dos movimentos de vertente;

A avaliação do grau de perda em função da magnitude/intensidade dos movimentos de vertente teve por referência o critério - profundidade da superfície de rotura do deslizamento. A profundidade da superfície de rotura foi inferida a partir da relação entre a área e o volume dos deslizamentos de acordo com as relações empíricas estabelecidas para a bacia do Rio Grande da Pipa por Oliveira (2012) e internacionalmente por Guzzetti *et al.* (2009). No caso da área de estudo, Oliveira (2012) utilizou 162 dos deslizamentos ocorridos durante o evento de instabilidade de 2010, onde foi possível inferir os parâmetros necessários para determinar o volume dos movimentos de vertente.

A profundidade da superfície de rotura foi então calculada a partir da equação 4.1 descrita por Surdenau (1986 *in* Zêzere, 1997) para os deslizamentos translacionais e pela equação 4.2 pela IAEG COMMISSION ON LANDSLIDES (1990) e Zêzere (1997) para os deslizamentos

rotacionais, ambas a partir dos volumes derivados das relações empíricas definidas por Oliveira (2012) e Guzzetti *et al.* (2009).



$$h = 0,785 / a/b / V_{mv} \quad (Eq. 4.1)$$

Figura 4.18 - Deslizamento translacional

Sendo: h – altura da cicatriz; a – metade da largura máxima da área afetada; b – comprimento do plano de rotura; e V_{mv} – volume (m^3).

$$Dd = 6 / V_{mv} * \pi / L / W \quad (Eq. 4.2)$$

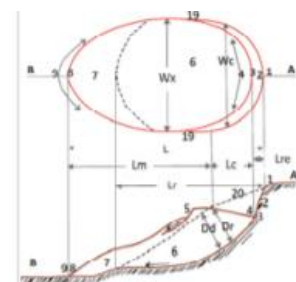


Figura 4.19 - Deslizamento rotacional

Sendo:


Dd – espessura máxima da massa deslizada, por vezes substituída pela profundidade máxima do plano de rotura; V_{mv} – volume (m^3); L – comprimento total da área afetada W – largura máxima da área afetada.

Desta forma, da aplicação das equações 4.1 e 4.2 foram obtidas duas estimativas da profundidade da superfície de rotura para cada um dos tipos de deslizamentos, translacionais e rotacionais estudados a partir do volume dos deslizamentos estimado pelas equações de Oliveira (2012) e Guzzetti *et al.* (2009). O valor final de profundidade de superfície de rotura foi determinado pela média dos valores de profundidade da superfície de rotura estimados com base nos dois volumes calculados.

4.3. CHECKLIST PARA A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE FÍSICA

Após a determinação dos critérios que permitiram estruturar as duas matrizes (estradas e edifícios) onde é relacionado o grau de perda/nível de danos com a respetiva tipologia de danos procedeu-se à elaboração de *checklists* que permitam guiar a determinação do grau de perda de um elemento exposto (estrada ou edifício) quando afetado por um movimento de vertente. O grau de perda final foi determinado tendo por base o nível de danos mais elevado definido de acordo com os critérios estabelecidos na abordagem Grau Perda2. Nas Figuras

4.20 e 4.21 são apresentadas duas *checklist* utilizadas para determinar o grau de perda originado por movimentos de vertente em estradas ou edifícios, respetivamente.



Instituto de Geografia e Ordenamento do Território
UNIVERSIDADE DE LISBOA

Local / Coordenadas:
Tipologia de movimento de vertente:
ID Movimento:

Setor do movimento

Cicatriz (R1)	<input type="checkbox"/>
Área de depleção (R2)	<input type="checkbox"/>
Área de Acumulação (R3)	<input type="checkbox"/>
Frete do deslizamento (R4)	<input type="checkbox"/>

Tipologia de Estradas

Estrada rural (terra batida) (V1)	<input type="checkbox"/>
Estrada municipal ou similar, desde que asfaltada (V2)	<input type="checkbox"/>
Estrada nacional (asfaltada) (V3)	<input type="checkbox"/>
Autoestrada (V4)	<input type="checkbox"/>

Abertura de fissuras/fendas de tração

<1 cm	0,2	<input type="checkbox"/>
≥ 1 – 5 cm	0,3	<input type="checkbox"/>
≥ 5 a 10 cm	0,4	<input type="checkbox"/>
≥ 10 a 30 cm	0,5; 0,6	<input type="checkbox"/>
> 30 cm	0,7; 0,9	<input type="checkbox"/>
Não aplicável		<input type="checkbox"/>

Amplitude de ondulação:

<5 cm	0,1; 0,3	<input type="checkbox"/>
<10 cm	0,4	<input type="checkbox"/>
≥ 10 a 30 cm	0,5 a 0,6	<input type="checkbox"/>
≥ 30 cm	0,7; 0,9	<input type="checkbox"/>

Parâmetros

Deformou a estrada? SIM ☐ NÃO ☐

Não sei. Afetou alguma camada? Se sim, qual? _____

Tempo de interrupção/ condicionamento da circulação

<1 dia	0,1	<input type="checkbox"/>
[1 a 3 dias	0,2	<input type="checkbox"/>
[3 a 5 dias	0,3	<input type="checkbox"/>
[5 a 10 dias	0,4	<input type="checkbox"/>
[10 a 15 dias	0,5	<input type="checkbox"/>
< 30 dias	0,6	<input type="checkbox"/>
< 90 dias	0,7	<input type="checkbox"/>
< 6 meses	0,8	<input type="checkbox"/>
< 12 meses	0,9	<input type="checkbox"/>
> 12 meses	1	<input type="checkbox"/>

Camada – Tipologia de estrada	Autoestrada – V4	Nacional (asfaltada) – V3	Estrada Municipal ou similar, desde que asfaltada – V2	Estrada rural (terra batida ou outros materiais menos resistentes – V1	Caminho – V1a
Desgaste					
Ligação	5 cm				
Base	15 cm				
Base granular	15 cm				
Sub-base granular	15 cm a 25 cm				
Aterro					
Solo natural					

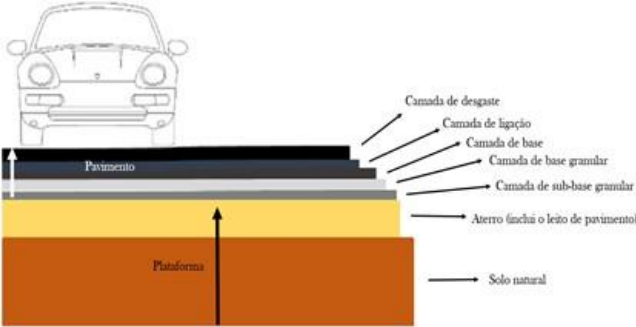


Figura 4.20 - *Checklist* para determinação do grau de perda (vulnerabilidade) de estradas a movimentos de vertente.

Local / Coordenadas:

Tipologia de movimento de vertente:

ID Movimento:

Setor do movimento

Cicatriz (B1)	<input type="checkbox"/>
Área de depleção (B2)	<input type="checkbox"/>
Área de Acumulação (B3)	<input type="checkbox"/>
Frente do deslizamento (B4)	<input type="checkbox"/>

Tipologia de Edifícios

Edifícios com outros elementos resistentes (madeira, metal) (E1)	<input type="checkbox"/>
Edifícios com pedra de adobe ou taipa (E2)	<input type="checkbox"/>
Edifícios com paredes de alvenaria argamassada (E3)	<input type="checkbox"/>
Edifícios com elementos resistentes de betão (E4)	<input type="checkbox"/>

Parâmetros

Acumulação de material:

<0,5 m	[0,1, 0,2]	<input type="checkbox"/>
≥ 0,5 a 2m	[0,3, 0,4]	<input type="checkbox"/>
≥ 2m	[0,5, 1]	<input type="checkbox"/>

Fendas/ desnível vertical

<1 mm	0,2	<input type="checkbox"/>
≥ 1 – 10 mm [	0,3	<input type="checkbox"/>
≥ 10 a 50 mm [	0,4	<input type="checkbox"/>
≥ 50mm	]0,5; 1]	<input type="checkbox"/>

Funcionalidade

[0,1; 0,2]	Deformação superficial da cobertura	<input type="checkbox"/>
0,3	Danos ligeiros em portas e janelas (não impede totalmente a funcionalidade)	<input type="checkbox"/>
0,4	Danos graves em portas e janelas (afeta a sua funcionalidade).	<input type="checkbox"/>
0,5	Deslocamento parcial de paredes ou painéis do edifício. Não compromete a integridade estrutural (não afeta pilares, placas, outros elementos de resistência estrutural)	<input type="checkbox"/>
0,6	Colapso parcial de paredes ou painéis do edifício. Compromete a integridade estrutural, afeta ligeiramente pilares, placas, outros elementos de resistência estrutural	<input type="checkbox"/>
0,7	Deslocamento ou colapso de fachada do edifício. Colapso de secções da estrutura sem afetar a estabilidade do edifício	<input type="checkbox"/>
0,8	Deslocamento ou colapso de fachada ou painéis do edifício. Queda parcial de pisos, fissuração grave ou colapso de secções da estrutura. Pode afetar a estabilidade do edifício.	<input type="checkbox"/>
0,9	Colapso ou inclinação de parte do edifício. Afeta a estabilidade do edifício.	<input type="checkbox"/>
1	Colapso total do edifício. Inclinação do edifício. Impeditiva da sua funcionalidade	<input type="checkbox"/>

Figura 4.21 - Checklist para determinação do grau de perda (vulnerabilidade) de edifícios a movimentos de vertente.

4.4. CURVAS DE FRAGILIDADE

As curvas de fragilidade expressam a probabilidade de uma estrutura/infraestrutura sofrer um determinado nível de danos físicos ou funcionais (grau de perda) em função da intensidade/magnitude do fenómeno perigoso (Mavrouli *et al.*, 2014; Sterlacchini, 2014; Papathoma-Köhle, 2016). As curvas de fragilidade podem ser empíricas (Garcia, 2012; Guillard-Gonçalves *et al.*, 2015) ou analíticas, dependendo da forma como é avaliado o grau de perda para uma dada magnitude de evento (Leóne *et al.*, 1996; Uzielli *et al.*, 2008).

No caso do presente trabalho, à semelhança de outros trabalhos (Glade, 2003; Baggio *et al.*, 2007; Papathoma-Köhle, 2016) são assumidos genericamente para a determinação das curvas de fragilidade cinco níveis de danos (D1 a D5) com uma variação de grau de perda de 0,2. A opção por esta generalização face aos níveis de danos e grau de perda utilizados na abordagem GrauPerda2 tem como finalidade dar maior consistência às curvas de fragilidade pelo aumento do número de registos de danos por classe de intensidade (*e.g.*, área, volume ou profundidade da superfície de rotura dos movimentos de vertente).

Quanto à probabilidade empírica calculada para as curvas de fragilidade de ocorrência de cada um dos valores ordenados é dada, de acordo com a lei de Gumbel (Gumbel, 1958):

$$P = \left(\frac{m}{N} + 1 \right) * 100 \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Onde: (m) representa o número de posição das respetivas observações, em que m=1 corresponde ao menor valor em relação ao total de registos (N) e (m=N) corresponde ao maior valor da série.

A probabilidade de não excedência foi determinada como:

$$P(x) = m/(N+1) \quad (\text{Eq. 4.4})$$

A probabilidade de um edifício numa dada BGRI ser afetado por um movimento de vertente é calculada através da seguinte equação:

$$E = \%A * PE/100 \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Onde: (%A) representa a probabilidade de ocorrer na BGRI área classificada com suscetibilidade elevada e muito elevada (quer para os movimentos superficiais como para os

movimentos de vertente profundos); PE corresponde à probabilidade de um edifício na BGRI ser de uma determinada tipologia tendo em consideração o número total de edifícios dessa BGRI.

4.5. SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE

A suscetibilidade corresponde à incidência espacial do perigo e representa a propensão para uma área ser afetada por um determinado fenómeno potencialmente perigoso, em tempo indeterminada, não contemplando o seu período de retorno ou a probabilidade de ocorrência (Julião *et al.*, 2009; Guzzetti *et al.*, 1999). A suscetibilidade é avaliada através da relação estatística entre um conjunto de variáveis, que expressam as características de um determinado território e que são assumidas como fatores de predisposição para a ocorrência de movimentos de vertente (variáveis independentes) e um conjunto de ocorrências (inventário de movimentos de vertente, variável dependente).

Na avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente foi usado o método do Valor Informativo (VI) (Yin e Yan, 1988), aplicado numa base matricial com células de 25 m² (5m x 5m). Este método estatístico bivariado tem sido utilizado com sucesso na área de estudo e na região norte de Lisboa para avaliar a suscetibilidade a movimentos de vertente. O método do Valor Informativo, de suporte Bayesiano, sustenta-se na transformação logarítmica (*log natural*) da razão entre probabilidade condicionada de encontrar um deslizamento numa determinada classe de cada variável assumida como fator de predisposição e probabilidade *A priori* de encontrar um deslizamento na área de estudo. Com este método é possível ponderar e hierarquizar cada classe de cada fator de predisposição para a instabilidade de vertentes de forma objetiva e quantificada (Soeters e van Westen, 1996).

O Valor Informativo (*Ii*) de cada classe das variáveis independentes (consideradas isoladamente como variável - *Xi*) foi determinado pela seguinte equação:

$$Ii = \ln \frac{Si/Ni}{S/N} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Onde: *Si* = nº de células com movimentos de vertentes na variável *Xi*; *Ni* = nº de células com a variável *Xi*; *S* = nº total de células com movimentos de vertentes; *N* = nº total de células da área de estudo.

Posteriormente o valor final de valor informativo para cada unidade de terreno (I_j) foi obtida através do somatório dos VI de cada fator de predisposição, pela seguinte equação:

$$I_j = \sum_{i=1}^n X_{ji} * I_i \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Onde: n – nº de variáveis; X_{ji} – presença (1) ou ausência (0) da variável na unidade de terreno; I_i – valor informativo da variável.

Devido à normalização logarítmica, I_i não é determinável quando $S_i = 0$. Nestes casos, o valor de I_i foi assumido como o decimal inferior ao I_i mais baixo entre todas as variáveis consideradas.

A estratégia utilizada para avaliar a suscetibilidade passou pela construção de 10 modelos de suscetibilidade de acordo com o tipo deslizamento estudado (translacional ou rotacional) ou considerando diferentes combinações de tipos de movimentos de vertente (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 - Modelos de suscetibilidade a deslizamentos considerados para a bacia do Rio Grande da Pipa

Modelo de suscetibilidade		Tipo de movimento de vertente					
#	ID	R	T	RS	RSA	TS	TSA
1	R_T	x	x				
2	RS_RSA			x	x		
3	RS_RSA_TS_TSA			x	x	x	x
4	RS_TS			x		x	
5	TS_TSA					x	x
6	TSA_RSA				x		x
7	RS			x			
8	RSA				x		
9	TS					x	
10	TSA						x

De forma a tornar possível a avaliação e comparação da capacidade preditiva dos diferentes modelos de suscetibilidade, todos os mapas de suscetibilidade a movimentos de vertente foram classificados em cinco classes de suscetibilidade. O critério utilizado para definir o limite de cada classe de suscetibilidade é a área do grupo de deslizamentos do grupo de validação que deve ser validada. As cinco classes de suscetibilidade (muito elevada, elevada, moderada, baixa e muito baixa) são definidas para que seja possível validar, da classe de suscetibilidade muito elevada para a classe de suscetibilidade muito baixa, cumulativamente (relativamente) a seguinte percentagem de área do grupo de movimentos de vertente de validação: 50 % (50 %), 75 % (25 %), 85 % (15 %), 95 % (10 %) e 100 % (5 %). Assim, por exemplo, a classe de suscetibilidade muito elevada corresponde à área classificada com os *scores* de valor informativo mais elevados e permite validar 50% da área ocupada por movimentos de vertente do grupo de validação. Por sua vez a classe de suscetibilidade mais reduzida corresponde à área que apresenta *scores* de VI mais baixos e valida os últimos 5 % de movimentos de vertente não abrangidos pelas classes de maior suscetibilidade. Os resultados foram ainda validados através da elaboração de curvas de sucesso e do cálculo das respetivas Área Abaixo da Curva (AAC).

4.6. EXPOSIÇÃO A MOVIMENTOS DE VERTENTE E CENARIZAÇÃO DE EXPOSIÇÃO/PERDAS POTENCIAIS

A avaliação da exposição a movimentos de vertente e a determinação de perdas potenciais de estruturas e infraestruturas é muito importante para o ordenamento do território (Uzielli *et al.*, 2008; Papathoma-Köhle *et al.*, 2011; Guillard-Gonçalves e Zêzere, 2012), proteção civil e planeamento de emergência (Fell *et al.*, 2008; Julião *et al.*, 2009; Kappes *et al.*, 2012; Corominas *et al.*, 2014; Sterlacchini *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2016), assim como, para as companhias de seguros.

No presente trabalho, a avaliação da exposição a movimentos de vertente foi restringida espacialmente à área do município de Arruda dos Vinhos que se encontra localizada na bacia do Rio Grande da Pipa. Este facto deveu-se sobretudo à incapacidade de em tempo útil de obter em formato digital a distribuição das estradas e edifícios por tipologia para toda a bacia do Rio Grande da Pipa.

Para efeitos de avaliação de perdas potenciais na área de estudo são assumidas todas as estradas assim como os edifícios (todas as tipologias de estrada e de edifícios, descritos na

Secção 4.2, à exceção de edifícios devolutos). No caso dos diferentes tipos de edifícios são explorados os dados dos CENSOS 2011 para determinar a exposição potencial e perdas potenciais. Para efeitos de cenarização e avaliação da exposição foram utilizadas as classes de suscetibilidade Elevada e Muito elevada, cruzando para o efeito a distribuição espacial dos elementos expostos com as áreas definidas com suscetibilidade elevada e muito elevada. Para a demonstração do grau de perda potencial em função da exposição de estradas e edifícios foram considerados ainda modelos de suscetibilidade efetuados com movimentos de vertente de determinada magnitude (cenarização). O modelo a deslizamentos superficiais teve como variável dependente todos os deslizamentos com profundidade da superfície de rotura $\leq 1,5$ m de profundidade (volume até 483 m³) e o modelo a deslizamentos profundos teve por base todos os deslizamentos com profundidade da superfície de rotura do deslizamento $\geq 1,5$ m de profundidade (volume superior a 483 m³).

Propositadamente deixado em branco

5.1. AVALIAÇÃO DE DANOS E DETERMINAÇÃO DE PADRÕES DE DEFORMAÇÃO EM ESTRADAS E EDIFÍCIOS

O principal objetivo desta dissertação, envolve a determinação de padrões regionais de vulnerabilidade estrutural de estradas e edifícios a movimentos de vertente do tipo deslizamento em função de um conjunto de fatores que condicionam o grau de perda do elemento exposto e de que são exemplo: (i) a resistência estrutural do elemento afetado; (ii) o tipo de movimento de vertente; (iii) a magnitude do movimento de vertente; (iv) a espessura do material deslizado ou a profundidade da superfície de rotura como *proxy* da intensidade, ou (v) a forma como a massa instabilizada afeta a estrutura/infraestrutura.

Numa primeira etapa são comparados os padrões de deformação (grau de perda / nível de danos), em estradas e edifícios determinados pelas abordagens GrauPerda1 e GrauPerda2. Uma comparação similar é feita tendo por base o impacto gerado pelos diferentes setores internos dos deslizamentos nas estradas e edifícios. Para permitir a comparação entre os diferentes parâmetros que podem ser utilizados como *proxy* da intensidade / magnitude dos movimentos de vertente, são apresentadas também neste capítulo as relações entre volume (m³), profundidade (m) e área (m²) dos deslizamentos que geraram danos em estradas e em edifícios.

5.1.1. ESTRADAS – ABORDAGENS GRAUPERDA1 E GRAUPERDA2

Como se pode constatar a partir das Figuras 5.1 (por tipo de estrada) e 5.3 (por setor do deslizamento que afeta a estrada), a relação entre o grau de perda e a magnitude dos deslizamentos não difere significativamente, apesar dos graus de perda ligeiramente inferiores na abordagem GrauPerda1 quando comparados com os determinados através da abordagem GrauPerda2 (Tabela 4.3 - estradas; Sec. 4.1.2.1). Estes resultados evidenciam um razoável ajuste da presente proposta aos critérios mais subjetivos, que têm sido utilizados para determinar qualitativamente a vulnerabilidade das estradas à ocorrência regional de movimentos de vertente.

A ligeira sobrevalorização do grau de perda evidenciada pela abordagem mais tradicional e subjetiva (GrauPerda1) parece dever-se ao facto das classes de nível de danos tipicamente definidas entre D1 a D5 apresentarem uma amplitude de 0,2 de intervalo de grau de perda, onde numa perspetiva mais conservadora, leva a associar o grau de perda ao limite superior da classe. Desta forma somos levados a considerar que os valores inferiores de graus de perda definidos pela abordagem GrauPerda2, quando comparados com os obtidos pela abordagem GrauPerda1, se devem apenas a um artifício gerado pela tentativa de aumento de resolução na determinação da vulnerabilidade.

As respetivas retas de tendência, apesar da fraca correlação expressa pelo coeficiente de determinação R^2 , permitem inferir no caso dos diferentes tipos de estrada (Figura 5.1), regra geral, uma tendência para o aumento do grau de perda, em função do aumento do volume dos deslizamentos que causaram esses mesmos danos. Esta tendência, apesar de se verificar independente do tipo de estrada, parece esbater-se com o aumento da resistência estrutural destas. Esta evidência, pode, no entanto, estar condicionada pelo facto de não existirem registos de danos moderados a elevados ($> 0,5$) provocados por deslizamentos com mais de 1.000 m^3 de volume, em número suficiente para todos os tipos de estradas asfaltadas (V2, V3 e V4), mais resistentes por comparação com as estradas rurais de terra (V1) e caminhos (V1a).

(i) Grau de perda associado a deslizamentos por tipo de estrada

As estradas rurais (V1, Figura 5.1A) atingem o valor mais elevado de grau de perda (1, nível de danos D5), em ambas as abordagens quando afetadas por deslizamentos com mais de 1.000 m^3 (uma profundidade da superfície de rotura de 1,9 m). Dois deslizamentos que afetaram este tipo de estradas correspondem a dois deslizamentos rotacionais profundos (239.017 m^3 e 60.423 m^3) ocorridos durante as obras de construção da autoestrada A10, na sub-bacia da Laje afetando a vertente acima do talude superior da autoestrada bem como toda a plataforma em desaterro onde viriam a ser construídas as vias de circulação da autoestrada. Uma vez que a estrutura da autoestrada não estava construída à data da ocorrência dos movimentos de vertente esta foi assumida como uma estrada rural (Figura 5.2). No caso dos deslizamentos de menor dimensão, isto é, com um volume inferior a 100 m^3 (profundidade da superfície de rotura de 1 m) o grau de perda não excedeu 0,2.

Os caminhos (V1a, Figura 5.1B) atingem o valor de grau de perda mais elevado (1, nível de danos D5), em ambas as abordagens, apenas em duas situações, em que estes foram afetados por deslizamentos com mais de 10.000 m³ (profundidade da superfície de rotura de 3,7 m), um dos casos registado na proximidade da Carnota (23.080 m³) e o outro na Louriceira (12.104 m³). Estes resultados são surpreendentes face ao expectável uma vez que a resistência estrutural dos caminhos é substancialmente menor do que a das estradas rurais. A razão para estes resultados, parece dever-se ao facto de a maioria dos registos de danos em caminhos estarem relacionados com o impacto do depósito dos movimentos de vertente que ocorrem no talude superior do caminho, gerando tipicamente valores de grau de perda mais baixos, não ultrapassando 0,8. Ainda assim é possível verificar que o grau de perda de 0,8 pode ser atingido pelo impacto de deslizamentos com menos de 100 m³ (profundidade da superfície de rotura de 1 m) o que atesta a menor resistência dos caminhos relativamente às estradas rurais.

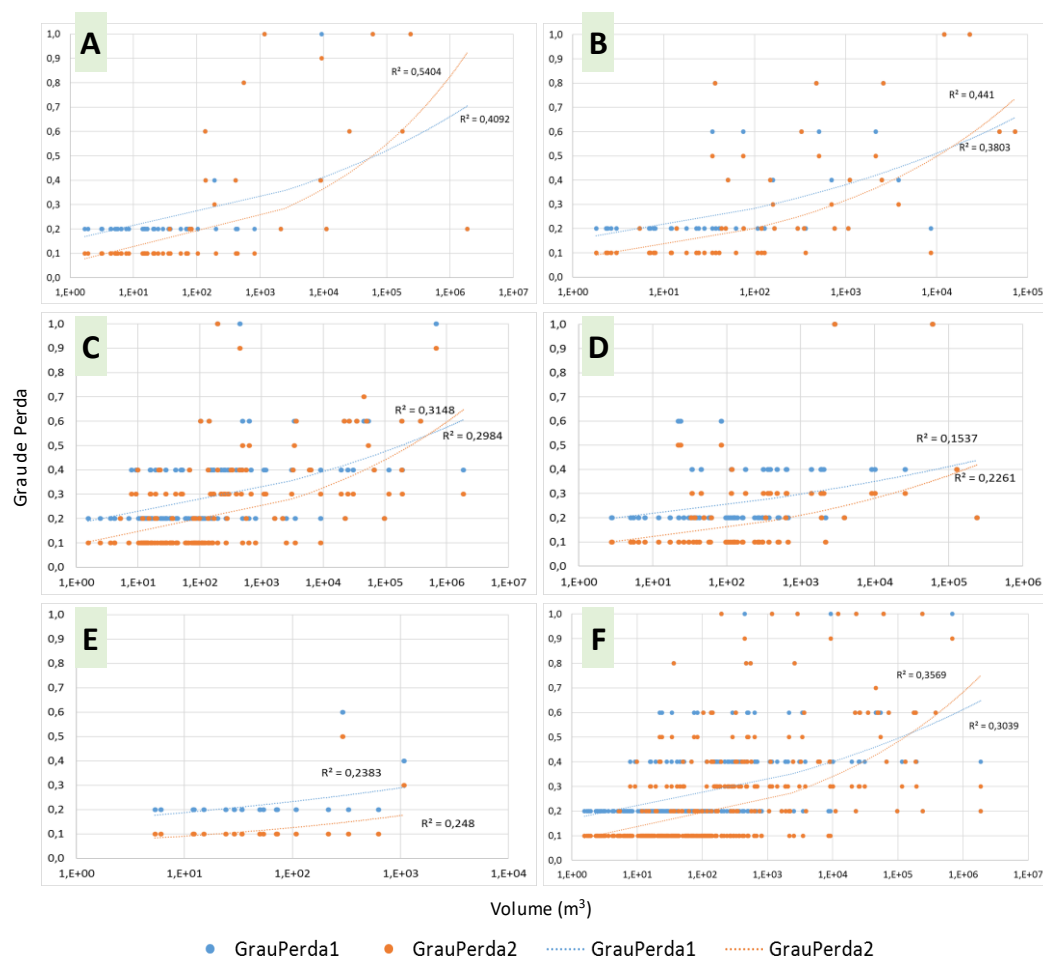


Figura 5.1 – Grau de perda por tipo de estrada em função da magnitude dos movimentos de vertente (volume - m³): A - Estradas rurais (V1); B - Caminho (V1a); C - Estrada Municipal (V2); D - Estrada Nacional (V3); E - Autoestrada (V4); F - Todas as estradas.

As estradas municipais (V2, Figura 5.1C) assim como as estradas nacionais (V3, Figura 5.1D) atingem o valor mais elevado de grau de perda (D5), em ambas as abordagens acima dos 100 m³ e 1.000 m³, respetivamente. Nas estradas municipais (V2), foi registado um grau de perda máximo de 1 (GrauPerda2) na sub-bacia de Santana da Carnota, por um deslizamento com um volume de apenas 196 m³ (Figura 5.3).



Figura 5.2 – Deslizamento rotacional profundo ocorrido durante a construção da autoestrada A10.
Fonte: Matos (2008).



Figura 5.3 – Deslizamento rotacional ocorrido perto de Pedra do Ouro, sub-bacia de Santana da Carnota.

Nas estradas nacionais (V3, Figura 5.1D) os deslizamentos que originam um grau de perda de 1 em ambas as abordagens surgem como dois *outliers* e têm um volume de 60.642 m³ e 2.897 m³. No essencial os registos existentes na bacia do RGP evidenciam que o grau de perda em estradas nacionais devido à ocorrência de deslizamentos não ultrapassa em regra 0,6.

No caso das autoestradas (V4, Figura 5.1E) e com base nos registos de danos disponíveis nunca se atingiu o grau de perda (D5), somente foi atingido um nível de danos significativos (D3) e um grau de perda de 0,5 (GrauPerda2), muito provavelmente sobrevalorizado uma vez que foi registado no talude inferior de uma via do nó de acesso à autoestrada. No essencial o grau de perda registado é de 0,1 (GrauPerda2) e 0,2 (GrauPerda1). Estes são registos de danos associados em grande medida à cedência da parte superior do talude da autoestrada com o depósito a atingir apenas a berma da plataforma asfaltada. Valores de grau de perda superior a 0,1 na abordagem GrauPerda2 só são provocados por deslizamentos com mais de 100 m³.

(ii) Grau de perda em estradas associado aos diferentes setores dos deslizamentos

A análise dos danos provocados pelos diferentes setores dos deslizamentos é ilustrada no caso das estradas através da Figura 5.4.1 e 5.4.2 e tem por base a separação morfológica dos deslizamentos (Figura 4.17) em: cicatriz (R1), área de depleção (R2), área de acumulação (R3) e frente do deslizamento (R4).

Nos casos em que os danos registados em estradas foram originados pela cicatriz do deslizamento (R1, Figura 5.4.1A), foi possível verificar que a maior parte dos danos registados não excedeu um grau de perda de 0,6 (nível de danos D3) na abordagem GrauPerda1 e 0,5 (nível de danos D3) na abordagem GrauPerda2. O nível de danos D5 (grau de perda de 0,9 e 1) é atingido por deslizamentos com volume entre 196 m³ (Figura 5.3) e 681.228 m³ podendo gerar o abandono da estrada ou destruindo por completo toda a estrutura da estrada.

Na área de depleção (R2, Figura 5.4.1B) o grau de perda 1 foi originado por deslizamentos com 23.080 m³ (bacia de Santana da Carnota) e 12.104 m³ (Louriceira), em ambos os casos afetaram caminhos destruindo-os por completo. De realçar que a possível diferença de grau de perda verificada até aqui pela utilização das duas abordagens, não se faz sentir quando as estradas são afetadas pela área de depleção e originando um grau de perda superior a 0,5.

A possível razão pode ser por exemplo o reduzido número de ocorrências registadas (17 casos, área média dos deslizamentos de 7.822 m²) e uma menor área média dos deslizamentos quando comparado por exemplo com R1 (102 casos, área média dos deslizamentos de 158.922 m²).

Na área de acumulação (R3, Figura 5.4.1C) três deslizamentos, um deslizamento rotacional profundo, na sub-bacia de Salema (60.642 m³) partiu a estrada da Mata em 1996 e dois na bacia da Laje (239.017 m³ e 60.423 m³) partiram a estrada ainda em desaterro durante a construção da autoestrada A10. À semelhança do caso anterior também aqui o número de registos de danos (24 casos) e a média da área de deslizamentos de aproximadamente 26.000 m² podem estar na origem da coincidência da classificação entre ambas as abordagens.

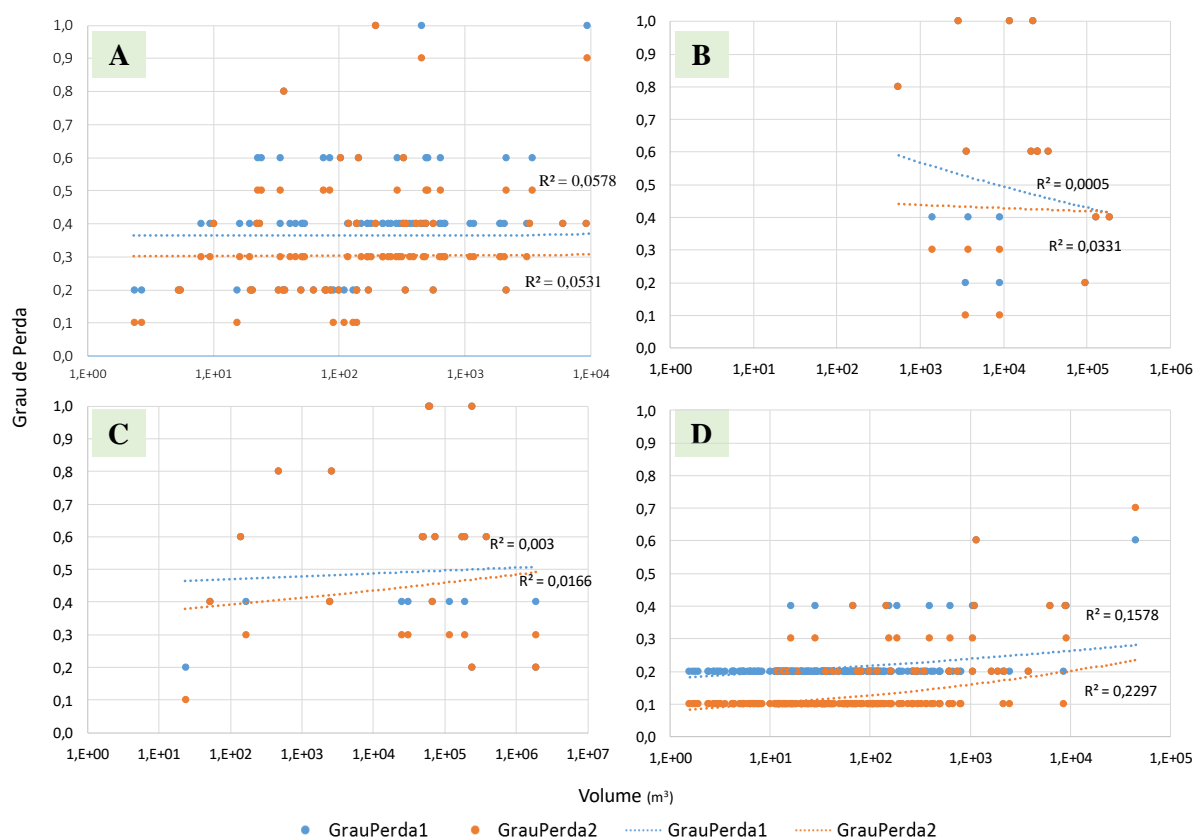


Figura 5.4.1 - Grau de perda em estradas por setor interno e magnitude dos movimentos de vertente: A: cicatriz (R1), B: área de depleção (R2), C: área de acumulação (R3) e D: frente do deslizamento (R4).

Na frente/pé do deslizamento (R4) foi considerado a situação de grau de perda mais elevada foi registada na sub-bacia de São Sebastião por um deslizamento rotacional com um volume

superior a 45.000 m³ cuja componente translacional localizada na frente do deslizamento interrompeu a estrada por várias situações ao longo de mais de 3 anos por períodos inferiores a 3 meses (Figura 4.13 que ilustram grau de perda de 0,5 e 0,6).

Como se pode observar novamente, e com poucas exceções face aos resultados analisados por tipologia de estrada, a relação entre o grau de perda e a magnitude dos deslizamentos não difere significativamente, apesar de graus de perda ligeiramente inferiores na abordagem GrauPerda2 quando comparada com GrauPerda1. Quando explorada a relação entre grau de perda e volume dos deslizamentos por setor do deslizamento que origina os danos em estradas (Figura 5.4.2) foi possível observar que foi na área de depleção (R2), na área de acumulação (R3) mas também na cicatriz (R1) que os deslizamentos causam maior grau de perda. Esse facto pode ser parcialmente explicado pela geometria dos deslizamentos rotacionais que predominantemente ocorrem na bacia do RGP. Nestes casos, são características descidas abruptas do “solo” na área imediatamente abaixo da cicatriz R1 (área de depleção, R2) e movimentos verticais do “solo”, a jusante, acima da superfície topográfica (área de acumulação, B3). No corpo do deslizamento, muitas vezes na área que separa a área de depleção da área de acumulação sobretudo no caso dos movimentos de vertente de maior dimensão, o grau de perda registado foi tipicamente baixo sobretudo nos edifícios devido ao facto da rotação do material deslizado nesta área se fazer sem grande deformação interna. Na frente/pé dos deslizamentos os danos registados foram relativamente inferiores, muito porque reportaram a depósitos de material deslocados para cima das estradas.

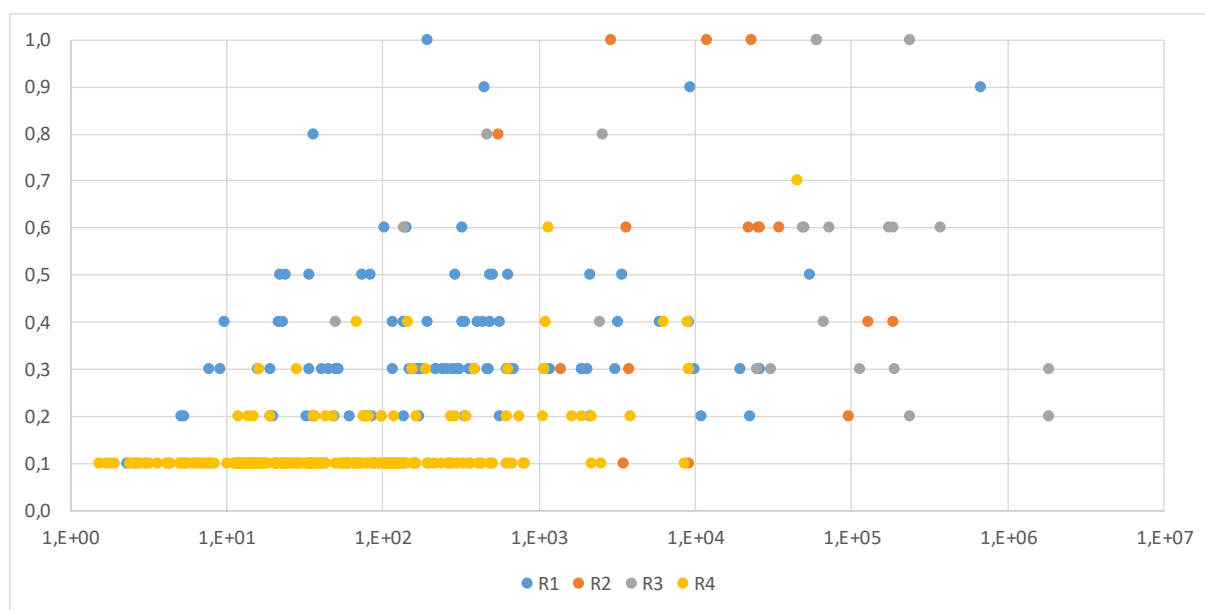


Figura 5.4.2 - Grau de perda2 em estradas por setor interno e magnitude dos movimentos de vertente.

5.1.1.1. RELAÇÃO ENTRE ÁREA, VOLUME E PROFUNDIDADE DA SUPERFÍCIE DE ROTURA DOS DESLIZAMENTOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR O GRAU DE PERDA EM ESTRADAS

O indicador utilizado para expressar a intensidade/magnitude dos deslizamentos na seção 5.1.1. foi o volume (m³). Para efeitos de transformação para outros indicadores de intensidade/magnitude, como sejam a área do deslizamento ou profundidade da superfície de rotura são apresentadas as seguintes relações: área/volume (Figura 5.5; Tabela 5.1); profundidade/volume da superfície de rotura (Figura 5.6; Tabela 5.2); profundidade/área da superfície de rotura (Figura 5.7; Tabela 5.3). Salienta-se ainda que a melhor relação foi estabelecida por regressão potencial, sendo a que apresentou sempre os valores mais elevados de correlação expressos pelo r², quando comparada com outros autores a correlação expressa por r² não difere significativamente.

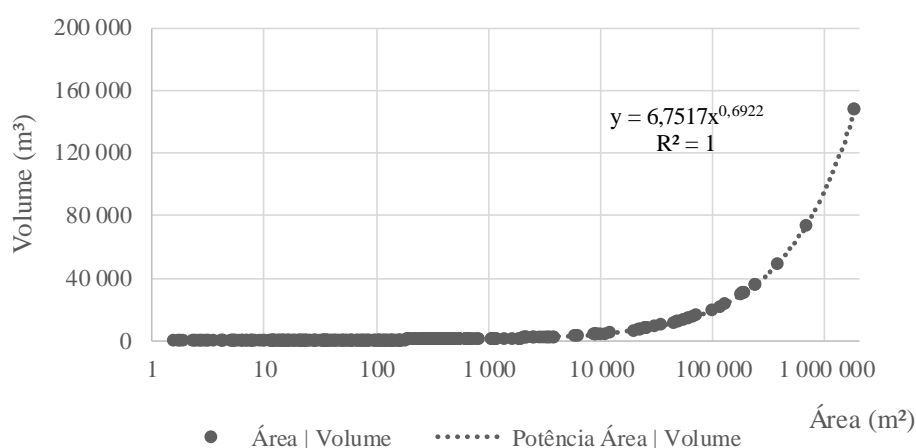


Figura 5.5 – Relação área (m²) / volume (m³) dos deslizamentos que originaram danos em estradas na bacia do RGP.

Tabela 5.1 - Relação área / volume dos deslizamentos com 100, 1.000, 10.000 e 100.000 m²

Área (m ²)	100	1.000	10.000	100.000	Equação $6,7517x^{0,6922}$
Volume (m ³)	163,6	805,4	3.964,7	19.517	$r^2 = 1$
Oliveira, 2012					Eq. $0,074x^{1,45}$
					$r^2 = 0,9707$

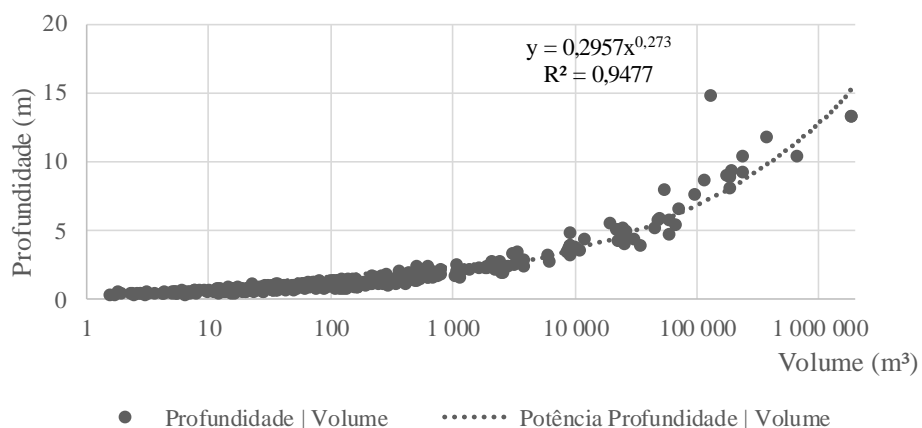


Figura 5.6 – Relação profundidade da superfície de ruptura (m) / volume (m³) para deslizamentos na bacia do RGP.

Tabela 5.2 - Relação profundidade / volume dos deslizamentos para deslizamentos com 100, 1.000, 10.000, 100.000 e 1.000.000 m³

Volume (m³)	100	1.000	10.000	100.000	1.000.000	Equação $0,2957x^{0,273}$
Profundidade (m)	1	1,9	3,7	6,9	12,8	$r^2= 0,9477$

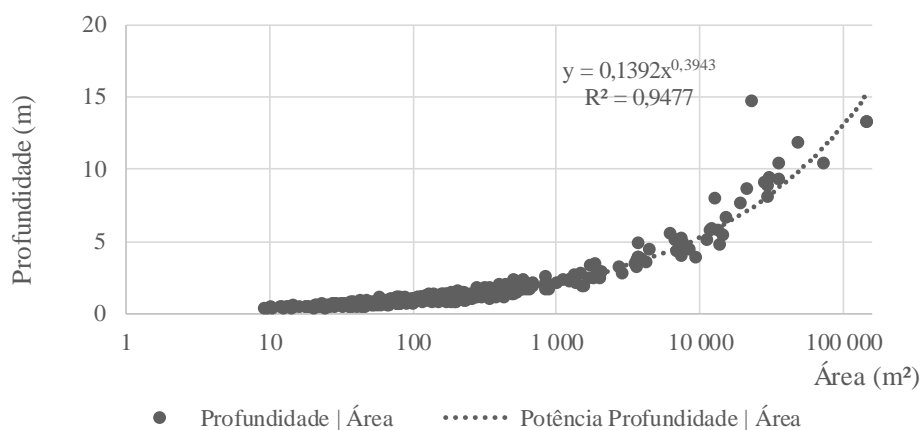


Figura 5.7 – Relação entre profundidade e área (m²) da superfície de ruptura (m) para deslizamentos na bacia do RGP.

Tabela 5.3 - Relação profundidade / área da superfície de ruptura para deslizamentos na bacia do RGP com 100, 1.000, 10.000 e 100.000 m².

Área (m²)	100	1.000	10.000	100.000	Equação = $0,1392x^{0,3943}$
Profundidade (m)	0,9	2,1	5,3	13	$r^2= 0,9477$

5.1.2. EDIFÍCIOS – ABORDAGENS GRAUPERDA1 E GRAUPERDA2

Nos edifícios apesar do número de registos de danos por deslizamentos serem reduzidos, por comparação com as estradas, foi tentado, de igual modo, estabelecer todas as relações possíveis entre nível de danos e volume dos deslizamentos para os diferentes tipos de edifícios e entre o nível de danos e os diferentes setores internos dos deslizamentos. No caso dos edifícios (Figura 5.8), com exceção dos edifícios com pedra de adobe ou taipa (Figura 5.8A) não é possível identificar a mesma tendência geral verificada nas estradas de aumento do grau de perda com o aumento do volume dos deslizamentos que geraram os danos. Este fato deve-se sobretudo ao reduzido número de registos de danos por tipo de edifício. Quando considerados todos os registos de danos em edifícios, sem separação da tipologia, os resultados evidenciam então um ligeiro aumento do grau de perda com o aumento da magnitude dos movimentos de vertente (Figura 5.6D), mas fortemente influenciada pelos edifícios de pedra de adobe ou taipa.

Nos edifícios com outros elementos resistentes (madeira, metal) (E1) não foi possível estabelecer qualquer tipo de relação pois só existe um registo de deslizamento a afetar este tipo de edifícios menos resistentes, este foi avaliado com grau de perda 0,4 (GrauPerda1) e 0,3 (GrauPerda2).

Nos edifícios de pedra de adobe ou taipa (E2, Figura 5.8A) o valor máximo de grau de perda registado (D5) foi observado quando afetados por deslizamentos com mais de 10.000 m³ em ambas as abordagens, especificamente, foram registados 4 deslizamentos que originaram um grau de perda de 1 com um volume de 131.501 m³, 95.325 m³, 23.080 m³ e 447.052 m³ e ocorreram na bacia da Zibreira, Salema, Santana da Carnota e Pé do Monte, respetivamente.

Os edifícios com paredes de alvenaria (E3, Figura 5.8B) não têm uma tendência crescente da relação entre o aumento da dimensão do deslizamento e o aumento grau de perda, que atinge o nível máximo apenas pelo impacto de um deslizamento rotacional profundo ao longo da estrada da Mata em 1996 com 60.642 m³ de volume na sub-bacia do rio Salema (Figura 5.9).

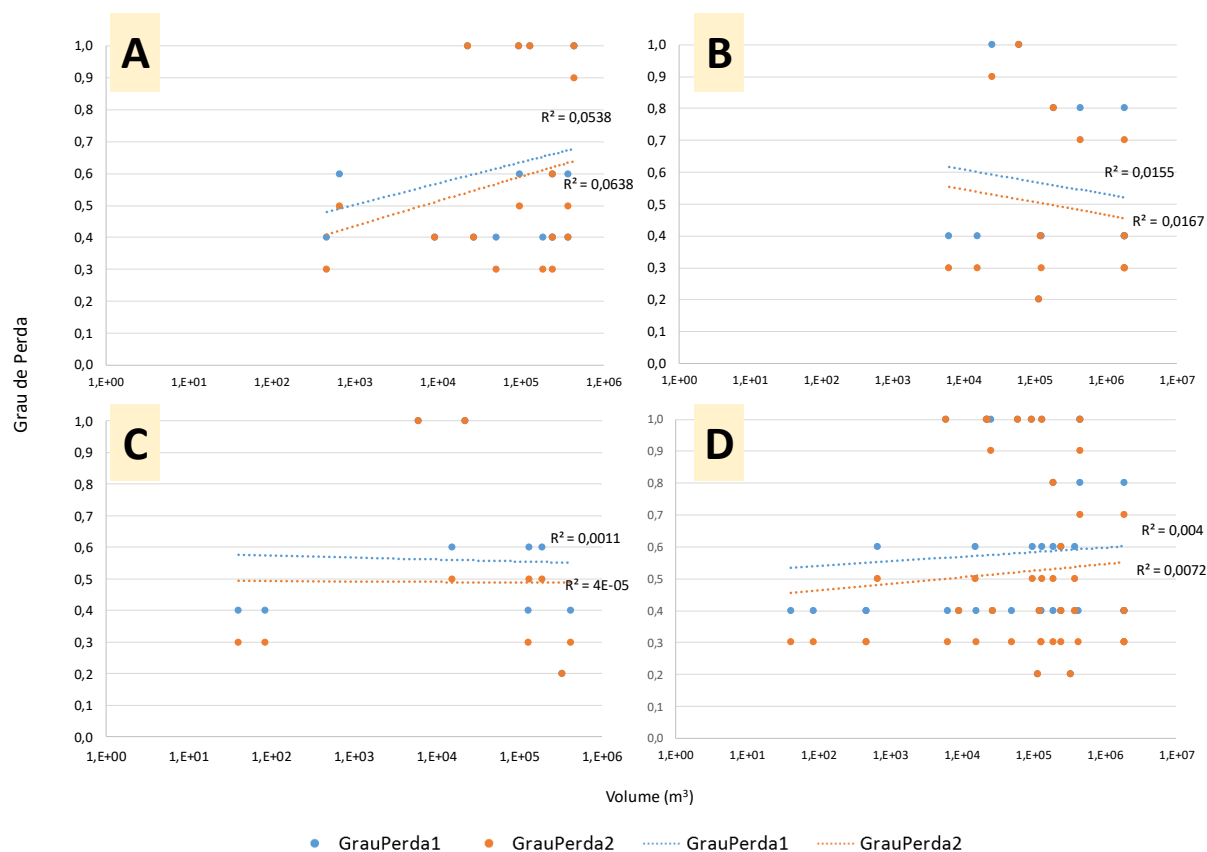


Figura 5.8 - Grau de perda por tipo de edifício em função da magnitude dos movimentos de vertente: A: Edifícios com pedra de adobe ou taipa (E2); B: Edifícios com paredes de alvenaria argamassada (E3); C: Edifícios com elementos resistentes de betão (E4); D: Todos os edifícios.



Figura 5.9 - Grau de perda de 1 por deslizamento rotacional profundo ao longo da estrada da Mata na sub-bacia do rio Salema.

Já para os edifícios com elementos resistentes de betão (E4, Figura 5.8C) o grau de perda de 1 (nível de danos D5) foi atingido pelo impacto de dois deslizamentos com mais de 5.000 m³, um na sub-bacia do rio Salema com 22.086 m³ e o outro na sub-bacia do Pé do Monte com 6.015 m³ (Figura 5.10). Neste último exemplo a estrutura de betão não sofreu danos, mas o facto de a casa ter inclinado quando afetada pela cicatriz do deslizamento, foi suficiente para levar ao abandono da construção e posterior desmantelamento.



Figura 5.10 - Grau de perda de 1 por deslizamento rotacional profundo na sub-bacia do rio Salema.

Quando a análise tem em consideração o impacto gerado nos edifícios pelos diferentes setores internos dos deslizamentos foram igualmente considerados quatro setores: cicatriz (B1), área de depleção (B2), área de acumulação (B3), frente/pé do deslizamento (B4) (Figura 5.11). Na cicatriz do deslizamento (B1, Figura 5.11A) o grau de perda 1 com 95.325 m³ na bacia de Salema e 6.015 m³ na bacia de Pé do Monte da qual inclina uma casa em construção (Figura 5.10). Quando os edifícios são afetados pela área de depleção (B2, Figura 5.11B) o grau de perda de 1 foi originado por um deslizamento com 447.052 m³ na bacia de Pé do Monte, destruindo a casa. Quer no caso de edifícios afetados pela cicatriz ou pela área de depleção é possível identificar uma ligeira tendência para o aumento do grau de perda com o aumento do volume da massa instabilizada.

Na área de acumulação (B3, Figura 5.11C) o grau de perda máximo é originado por deslizamentos com volume entre 22.086 m³ (sub-bacia de Salema, destrói garagem anexa a

casa) e 131.500 m³ (bacia da Zibreira). A tendência negativa na relação entre aumento da magnitude do deslizamento e aumento do grau de perda nos edifícios revela a complexidade de situações de grau de perda que se podem gerar nestas áreas.

Na frente do deslizamento (B4, Figura 5.11D) todos os três registos não vão além de um grau de perda de 0,4 (GrauPerda1) e um grau de perda de 0,3 (GrauPerda2).

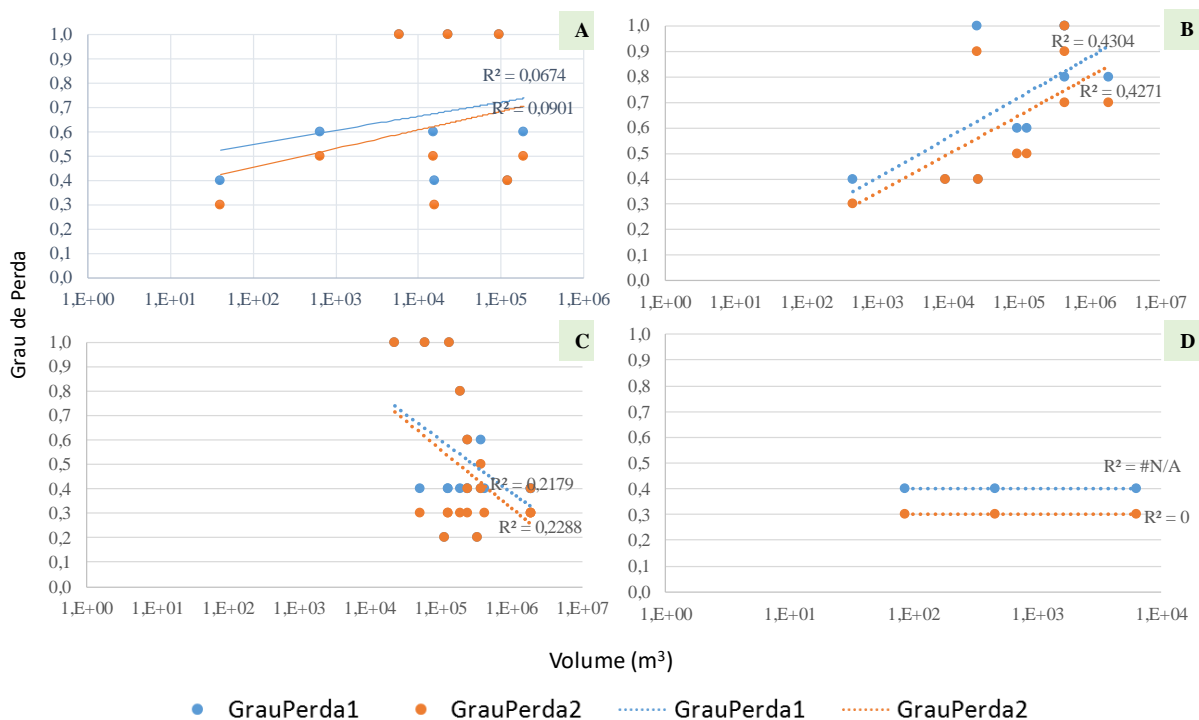


Figura 5.11 – Grau de perda dos edifícios por setor interno e magnitude dos movimentos de vertente: A: cicatriz (B1), B: área de depleção (B2), C: área de acumulação (B3), D: frente/pé do deslizamento (B4).

A área de depleção (B2/R2) e a área de acumulação (B3/R3) são os setores onde os deslizamentos causam maior grau de perda e esse facto pode ser parcialmente explicado pelo tipo e geometria característica dos movimentos de vertente que ocorrem na bacia do RGP. Ocorrem sobretudo, deslizamentos, no essencial com uma geometria da superfície de rotura curva (deslizamento rotacional). Nestes casos, são características descidas abruptas do “solo” na área imediatamente abaixo da cicatriz (área de depleção, B2 e R2) e movimentos verticais do “solo”, a jusante, acima da superfície topográfica (área de acumulação, B3 e R3). No corpo do deslizamento, muitas vezes na área que separa a área de depleção da área de acumulação, sobretudo no caso dos movimentos de vertente de maior dimensão, o grau de perda registado

foi tipicamente baixo devido ao facto da rotação do material deslizado nesta área se fazer sem grande deformação interna.

5.1.2.1 RELAÇÃO ENTRE ÁREA, VOLUME E PROFUNDIDADE DA SUPERFÍCIE DE ROTURA DOS DESLIZAMENTOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR O GRAU DE PERDA EM EDIFÍCIOS

Tal como nas estradas, para efeitos de transformação para outros indicadores de intensidade/magnitude, como sejam a área ou a profundidade da superfície de rotura são apresentadas as seguintes relações: área (m²) / volume (m³) (Figura 5.12; Tabela 5.4); volume (m³) /profundidade da superfície de rotura (m) (Figura 5.13; Tabela 5.5); área (m²) /profundidade da superfície de rotura (m) (Figura 5.14; Tabela 5.6). Salienta-se da mesma forma que a melhor relação foi estabelecida por uma regressão potencial, sendo a que s sempre a apresentou os valores mais elevados de correlação expressos pelo r².

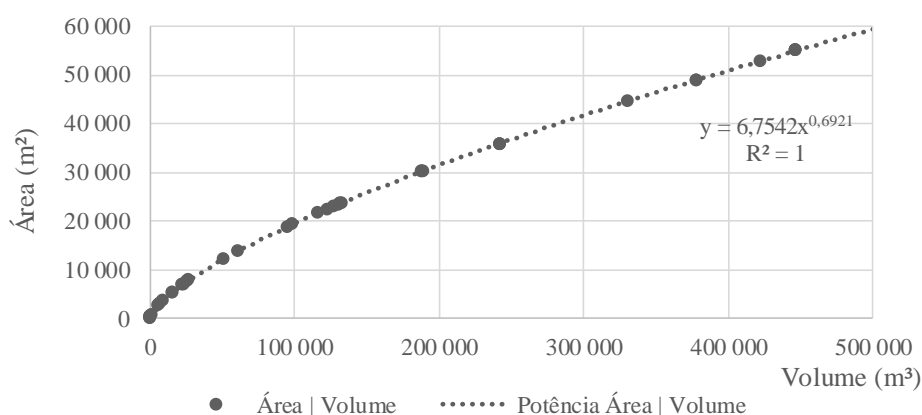


Figura 5.12 – Relação entre área (m²) e volume (m³) para deslizamentos na bacia do RGP

Tabela 5.4 - Relação entre área / volume para deslizamentos na bacia do RGP com áreas de 100, 1.000, 10.000 e 100.000 m²

Área (m ²)	100	1.000	10.000	100.000	Equação = $6,7542x^{0,6921}$
Volume (m ³)	163,6	805,1	3962,5	19501,8	$r^2=1$

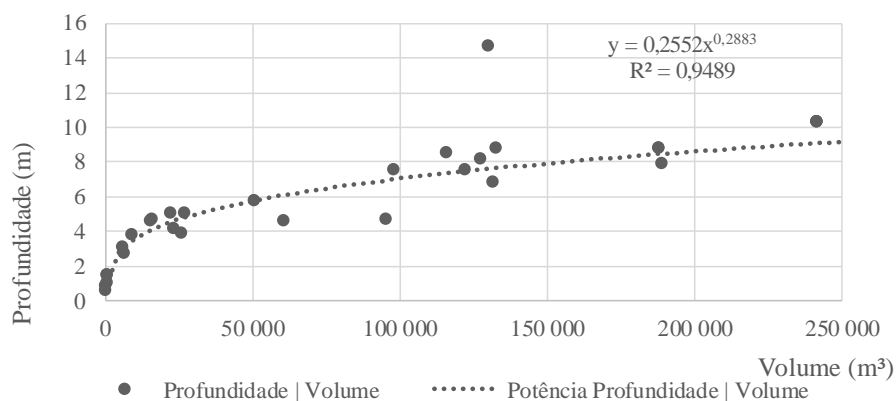


Figura 5.13 – Relação entre profundidade da superfície de rotura (m) e volume (m³) para deslizamentos na bacia do RGP

Tabela 5.5 - Relação entre profundidade da superfície de rotura e volume para deslizamentos na bacia do RGP com volumes de 50.000, 100.000, 150.000, 200.000 e 250.000 m³

Volume (m³)	50.000	100.000	150.000	200.000	250.000	Equação = $0,2552x^{0,2883}$
Profundidade (m)	5,8	7,1	7,9	8,6	9,2	$r^2=0,9489$

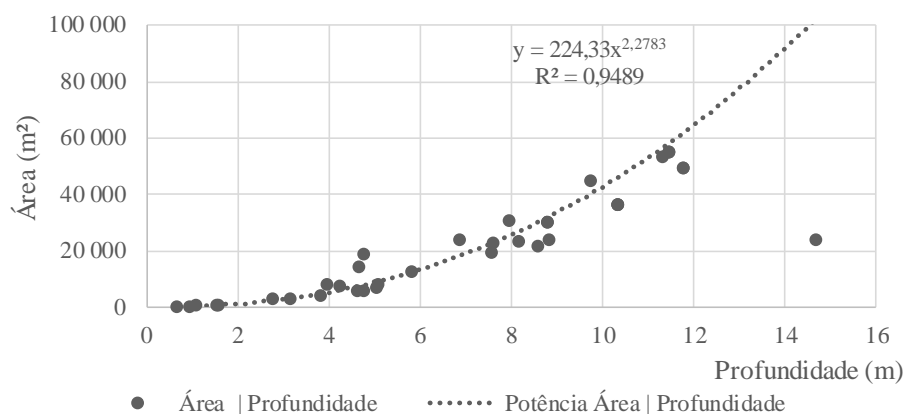


Figura 5.14 – Relação entre área (m²) e profundidade da superfície de rotura (m) para deslizamentos na bacia do RGP

Tabela 5.6. Relação entre área / profundidade da superfície de rotura para deslizamentos na bacia do RGP com profundidade da superfície de rotura de 1, 5, 10 e 15 m.

Profundidade (m)	1	5	10	15	Equação = $224,33x^{2,2783}$
Área (m²)	244,3	9559,6	46374,2	116806,1	$r^2=0,9489$

Dando como exemplo o deslizamento rotacional profundo ocorrido nos Casais da Capelã em dezembro de 1989, Figura 5.15, foi possível inferir quer através de bibliografia, sobretudo a partir da descrição feita por Machado (1990), quer através de trabalho de campo e informações fornecidas pelos proprietários das casas afetadas, o grau de perda sofrido mesmo passadas algumas décadas. Num deslizamento como este, que afetou quase 150.000 m² de área instabilizada foi possível constatar que a deformação/danos sofridos pelos diferentes edifícios não foi similar e que para o efeito muito contribuiu a geometria dos diferentes setores internos do deslizamento para ampliar ou reduzir o nível de danos. Na Figura 5.16 são visíveis à data do trabalho de campo (2017) ainda danos gerados em 1989, como sejam casas que permanecem parcialmente inclinadas, mas também danos mais recentes gerados por deformação pós-rotura.

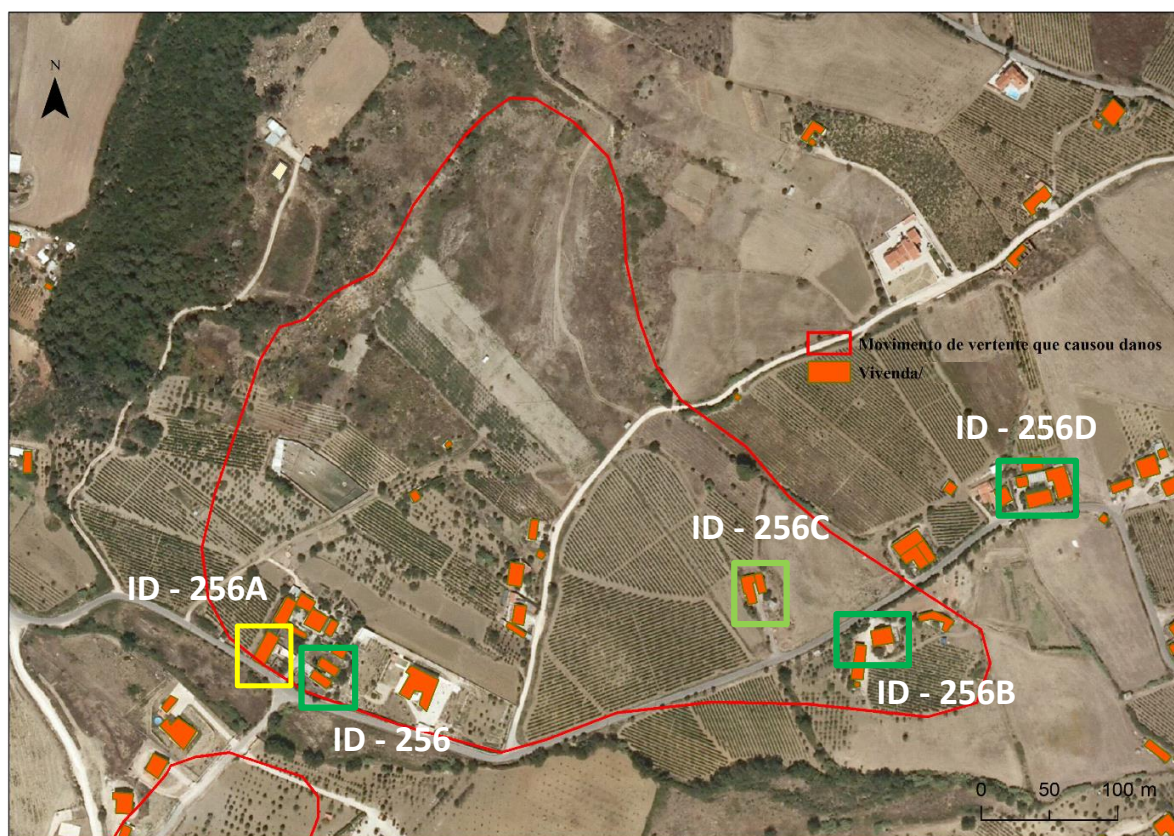


Figura 5.15 – Deslizamento rotacional profundo ocorrido nos Casais da Capelã e distribuição dos edifícios afetados pelo deslizamento em 1989 e áreas afins.



ID - 256
Fendas
Inclinada
Não há perda de funcionalidade
Ab. 1 – 0,4
Ab. 2 – 0,3



ID – 256A
Não há perda de funcionalidade
Ab. 1 – 0,8
Ab. 2 – 0,7



ID – 256B
Muro tombado
Casa está inclinada
Fendas de 4 cm
Ab. 1 – 0,4
Ab. 2 – 0,3



ID – 256C
Fendas 3 cm
Desnível de 1 cm
Ab. 1 – 0,4
Ab. 2 – 0,4



ID – 256D
Fendas de 1 cm
Muro curvado + vinhas
Ab. 1 – 0,4
Ab. 2 – 0,3

Figura 5.16 – Casas afetadas pelo/na área do deslizamento rotacional ocorrido nos Casais da Capelã, em 1989. Registo de danos visíveis em 2017.

5.2. INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE FÍSICA

5.2.1. DISPERSÃO DOS VALORES DE GRAU DE PERDA EM FUNÇÃO DA INTENSIDADE DOS DESLIZAMENTOS

De forma a compreender melhor a incerteza que envolve o grau de perda em estradas e edifícios quando afetados por um deslizamento de uma determinada intensidade/magnitude foram construídos gráficos *boxplot* que ilustram a incerteza registada na relação grau de perda – intensidade. Neste caso foi utilizado como *proxy* a profundidade da superfície de rotura dos deslizamentos. As relações área, volume e profundidade da superfície de rotura foram expressas anteriormente nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 para as estradas e nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 para os edifícios. Os danos foram agrupados por classes de profundidade de superfície de rotura sendo no caso dos deslizamentos até 3 metros de profundidade em classes de 0,5 metros, os deslizamentos entre os 3 metros e os 5 metros foram agrupados em classes com uma amplitude de 1 metro, por último, os movimentos mais profundos foram agrupados em classes com amplitudes entre os 5 a 10 metros e superiores a 10 metros.

Observando a Figura 5.17A, que inclui todas as estradas afetadas por deslizamentos sem atender à sua resistência estrutural constata-se, regra geral, em termos médios (à exceção entre 2 aos 4 metros) um aumento progressivo do grau de dispersão do grau de perda à medida que estas são afetadas por deslizamentos cada vez mais profundos, como se pode constatar grosso modo pelo aumento do intervalo interquartil. A distribuição tende ainda a apresentar uma assimetria negativa dada pela maior proximidade da mediana ao 3º quartil. No entanto também é possível observar que os valores máximos de grau de perda ultrapassam o grau de perda de 0,9 em todas as profundidades à exceção da classe 0 – 0,5 m (com 0,5 de grau de perda) e 2,5 – 3 m e 3 – 4 m (com 0,6 de grau de perda). Relativamente ao valor mínimo todos mantiveram 0,1 de grau de perda exceto as profundidades superiores a 4 m que superaram os 0,2 e 0,3.

Quanto à tipologia V1 caminhos (Figura 5.17B), os dados são bastante mais escassos, mas observa-se um aumento da dispersão na classificação do grau de perda nas classes de profundidades de superfície de rotura mais baixas. O valor máximo de grau de perda é atingido para profundidades da superfície de rotura de 1,5 a 2 m (1 de grau de perda) e os valores mínimos de grau de perda não excedem 0,1 para profundidades da superfície de rotura até 2 m sendo que para profundidades superiores a 3 m, o valor mínimo de grau de perda

parece subir bastante com o aumento da profundidade da superfície de rotura embora fosse necessário mais dados para comprovar esta tendência.

A tipologia V1a (Figura 5.17C) regista um valor extremo máximo e mínimo de 1 na classe 4 a 5 m (único caso) seguindo o grau de perda máximo de 0,8 nas classes 0,5 – 1 m, 1 – 1,5 m e 1,5 – 2 m, o valor mínimo situa-se entre os 0,1 e 0,6.

A tipologia V2 (Figura 5.17D) tem um valor extremo máximo de 1 na classe 0,5 – 1 m, e um valor extremo mínimo de 0,1 na maioria das classes. A dispersão do grau de perda em função da profundidade da superfície de rotura para este tipo de estradas municipais ou asfaltadas tende a ser um pouco superior quer nos casos dos deslizamentos superficiais, até 1,5m de profundidade, quer para os deslizamentos mais profundos, com mais de 5 m de profundidade da superfície de rotura.

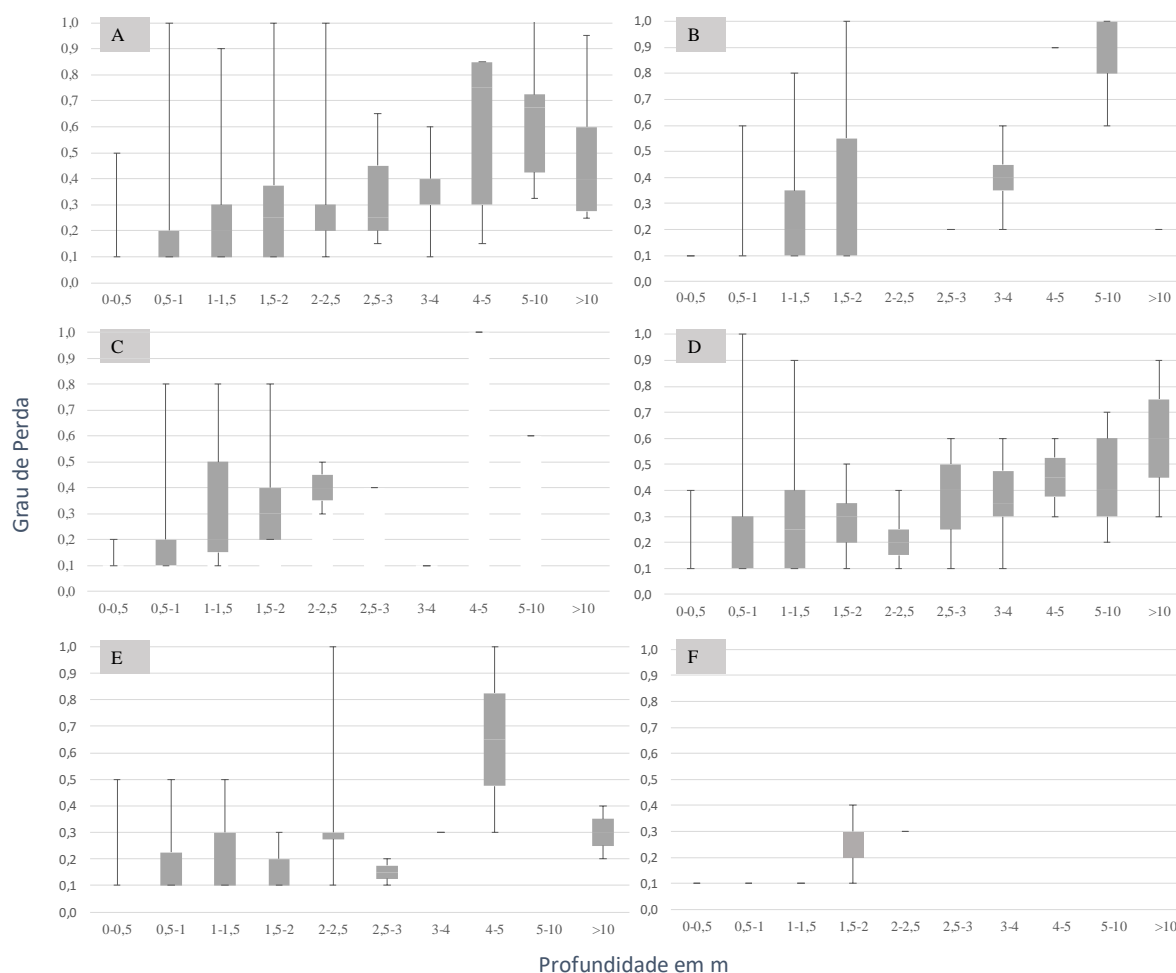


Figura 5.17 – Relação grau de perda registado por tipo de estrada na bacia do RGP e profundidade da superfície de rotura (m). A – Todas as estradas; B –V1 – estradas rurais; C –V1a - caminhos; D - V2 – estradas municipal ou asfaltada; E - V3 – estrada nacional; F - V4 – autoestrada.

No caso V3 - estradas nacionais (Figura 5.17E) o grau de dispersão no grau de perda não é muito elevado e para deslizamentos superficiais os valores máximos e mínimos aproximam-se bastante dos limites do intervalo interquartil. No caso dos deslizamentos intermédios e profundos assume-se que os dados não permitem uma leitura adequada e que mais dados seriam necessários. No caso das autoestradas V4 (Figura 5.17F) não é possível fazer uma análise coerente devido ao reduzido número de casos.

De uma forma geral, é possível demonstrar que o aumento da profundidade da superfície de rotura traduziu-se por um aumento do grau de perda nos diferentes tipos de estradas, no entanto existe alguma incerteza que deriva sobretudo: ou da geometria (área / volume) particular do movimento de vertente (e nesse caso pode ser um *outlier*, isto é uma situação excecional) ou então pode ter a ver com a estimativa feita da profundidade da superfície de rotura. Admite-se que a profundidade da superfície de rotura possa estar ligeiramente subavaliada/sobreavaliada.

Quanto aos edifícios (Figura 5.18), só foi possível estabelecer a relação entre grau de perda e intensidade dos movimentos de vertente utilizando todos os casos para os quais existiam registos, sem fazer dessa forma, diferenciação em função da diferente resistência estrutural dos edifícios afetados. O valor máximo de grau de perda de 1 foi observado apenas nas situações em que a profundidade da superfície de rotura dos deslizamentos excedeu 3 m. Já o valor mínimo de grau de perda mínimo observado oscilou entre 0,2 e 0,4 não se registando nenhuma tendência em particular. A falta de dados dificulta a análise da dispersão dos valores de grau de perda em função da profundidade dos deslizamentos, ainda assim é maior para profundidades da superfície de rotura acima de 3 m.

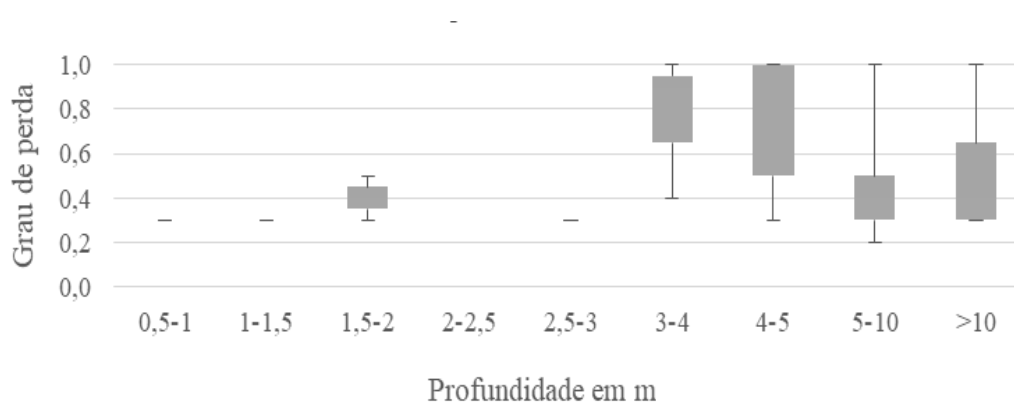


Figura 5.18 – Relação grau de perda – intensidade no caso dos edifícios

5.2.2. CURVAS DE FRAGILIDADE PARA ESTRADAS E EDIFÍCIOS AFETADOS POR DESLIZAMENTOS

Neste ponto do trabalho, são apresentados esboços de curvas de fragilidade, tendo por base graus de perda exetáveis em estradas e edifícios de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e 1 com correspondência nos níveis de danos D1 a D5. Foram diferenciadas todos os tipos de estradas (Figura 5.19), e no caso dos edifícios as curvas são projetadas sem diferenciação de tipologia (Figura 5.20), devido à falta de dados. De salientar, que a probabilidade de excedência dos valores de grau de perda atrás referidos foi estimada para cinco classes de profundidade: 0 a 0,5m; 0,5m a 1m; 1m a 2m, 2m a 4m e superior a 4 m, igualmente devido à falta de dados em algumas classes.

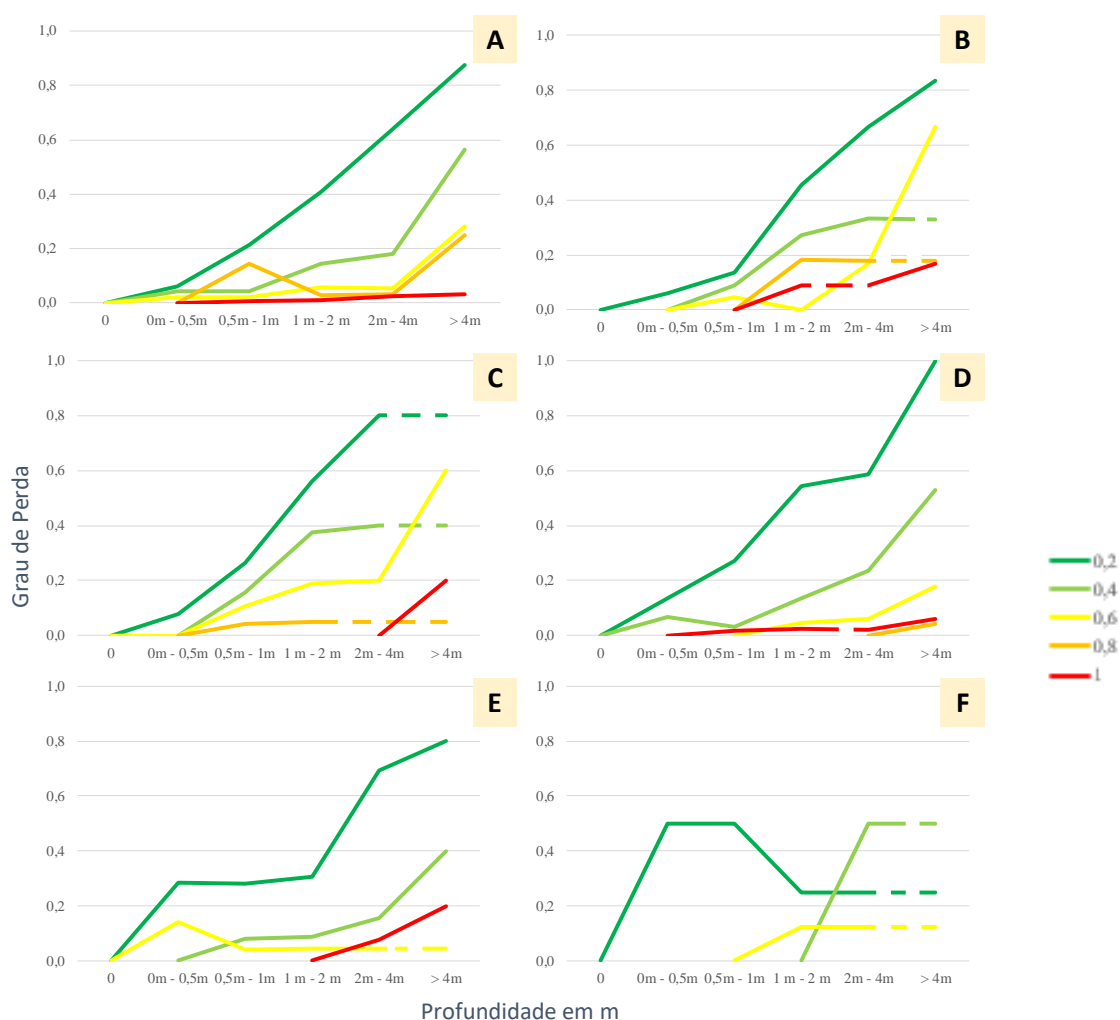


Figura 5.19 – Curvas de fragilidade; A – Todas as estradas; B – Tipologia V1 – estradas rurais; C – Tipologia V1a - caminhos; D - Tipologia – V2 – estradas municipal ou asphaltada; E - Tipologia V3 – estrada nacional; F - Tipologia V4 – autoestrada.

Da análise da Figura 5.19 é possível verificar que a probabilidade de um qualquer valor de grau de perda ser atingido tende a aumentar com o aumento da profundidade da superfície de rotura do deslizamento, com algumas exceções devido ao reduzido número de registos de danos em edifícios. Se a análise tiver em consideração o nível de danos podemos também facilmente constatar que a probabilidade de um determinado nível de danos (grau de perda) ser excedido diminui na direção do aumento do nível de danos. No caso dos edifícios (Figura 5.20), devido à falta de dados a figura não permite uma interpretação adequada da probabilidade de excedência de um qualquer nível de danos a partir da profundidade da superfície de rotura dos deslizamentos que afetaram os edifícios na bacia do RGP.

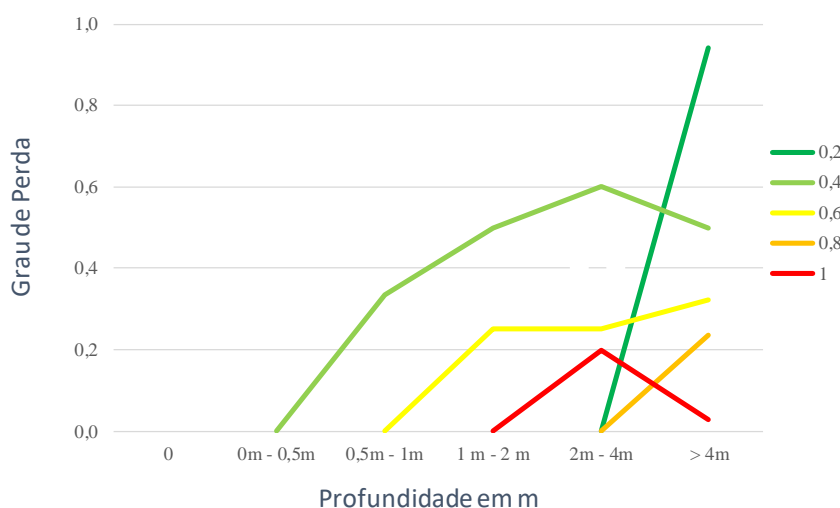


Figura 5.20 – Curva de fragilidade para os edifícios.

5.2.3. “MATRIZES” DE VULNERABILIDADE PARA ESTRADAS E EDIFÍCIOS AFETADOS POR DESLIZAMENTOS

Relativamente às matrizes de vulnerabilidade a opção recaiu por apresentar os valores de dispersão do grau de perda originado por deslizamentos em estradas (Tabela 5.7) e em edifícios (Tabela 5.8) tendo como referência os valores que estão na base da avaliação da dispersão na secção 5.2.1. São assim apresentados os seguintes valores de grau de perda por classe de profundidade de superfície de rotura: máximo, mínimo, médio, mediana, 1º quartil, 3º quartil e desvio-padrão (DP).

Tabela 5.7 – Análise estatística de valores de grau de perda em estradas para cada tipologia de estrada

Profundidade (m) →		0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-4	4-5	5-10	>10
Todas	Máximo	0,50	1,00	0,90	1,00	1,00	0,60	0,60	1,00	1,00	0,90
	Mínimo	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,30	0,20	0,20
	Mediana	0,10	0,10	0,20	0,25	0,30	0,20	0,30	0,90	0,55	0,35
	1 Quartil	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20	0,15	0,30	0,45	0,30	0,23
	3 Quartil	0,10	0,20	0,30	0,38	0,30	0,40	0,40	1,00	0,60	0,55
	Média	0,12	0,19	0,24	0,30	0,30	0,29	0,35	0,73	0,51	0,43
	DP	0,07	0,14	0,19	0,23	0,20	0,17	0,15	0,30	0,23	0,25
V1	Máximo	0,10	0,60	0,80	1,00	--	0,20	0,60	0,90	1,00	0,20
	Mínimo	0,10	0,10	0,10	0,10	--	0,20	0,20	0,90	0,60	0,20
	Mediana	0,10	0,10	0,20	0,10	--	0,20	0,40	0,90	1,00	0,20
	1 Quartil	0,10	0,10	0,10	0,10	--	0,20	0,35	0,90	0,80	0,20
	3 Quartil	0,10	0,10	0,35	0,55	--	0,20	0,45	0,90	1,00	0,20
	Média	0,10	0,15	0,29	0,40	--	0,20	0,40	0,90	0,87	0,20
	DP	0,00	0,12	0,24	0,42	--	0,00	0,14	0,00	0,19	0,00
V1a	Máximo	0,20	0,80	0,80	0,80	0,50	0,40	0,10	1,00	0,60	--
	Mínimo	0,10	0,10	0,10	0,20	0,30	0,40	0,10	1,00	0,60	--
	Mediana	0,10	0,10	0,20	0,30	0,40	0,40	0,10	1,00	0,60	--
	1 Quartil	0,10	0,10	0,15	0,20	0,35	0,40	0,10	1,00	0,60	--
	3 Quartil	0,10	0,20	0,50	0,40	0,45	0,40	0,10	1,00	0,60	--
	Média	0,12	0,77	0,34	0,38	0,40	0,40	0,10	1,00	0,60	--
	DP	0,04	0,15	0,23	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	--
V2	Máximo	0,40	1,00	0,90	0,50	0,40	0,60	0,60	0,60	0,70	0,90
	Mínimo	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,30	0,20	0,30
	Mediana	0,10	0,10	0,25	0,30	0,20	0,40	0,35	0,45	0,40	0,60
	1 Quartil	0,10	0,10	0,10	0,20	0,15	0,25	0,30	0,38	0,30	0,45
	3 Quartil	0,10	0,30	0,40	0,35	0,25	0,50	0,48	0,53	0,60	0,75
	Média	0,14	0,18	0,27	0,29	0,21	0,37	0,37	0,45	0,42	0,60
	DP	0,08	0,14	0,18	0,14	0,10	0,21	0,16	0,15	0,16	0,24
V3	Máximo	0,50	0,50	0,50	0,30	1,00	0,20	0,30	1,00	--	0,40
	Mínimo	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,30	0,30	--	0,20
	Mediana	0,10	0,10	0,10	0,10	0,30	0,15	0,30	0,65	--	0,30
	1 Quartil	0,10	0,10	0,10	0,10	0,28	0,13	0,30	0,48	--	0,25
	3 Quartil	0,10	0,23	0,30	0,20	0,30	0,18	0,30	0,83	--	0,35
	Média	0,17	0,84	0,18	0,16	0,35	0,15	0,30	0,65	--	0,30
	DP	0,15	0,14	0,12	0,08	0,25	0,05	0,00	0,35	--	0,10
V4	Máximo	0,10	0,10	0,10	0,50	0,30	--	--	--	--	--
	Mínimo	0,10	0,10	0,10	0,10	0,30	--	--	--	--	--
	Mediana	0,10	0,10	0,10	0,30	0,30	--	--	--	--	--
	1 Quartil	0,10	0,10	0,10	0,20	0,30	--	--	--	--	--
	3 Quartil	0,10	0,10	0,10	0,40	0,30	--	--	--	--	--
	Média	0,10	0,10	0,10	0,30	0,30	--	--	--	--	--
	DP	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	--	--	--	--	--

Tabela 5.8 - Análise estatística de valores de grau de perda em edifícios

Profundidade (m) →	0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-4	4-5	5-10	>10
Máximo	--	0,30	0,30	0,50	--	0,30	1,00	1,00	1,00	1,00
Mínimo	--	0,30	0,30	0,30	--	0,30	0,40	0,30	0,20	0,30
Mediana	--	0,30	0,30	0,40	--	0,30	0,90	1,00	0,40	0,40
Todos 1 Quartil	--	0,30	0,30	0,35	--	0,30	0,65	0,50	0,30	0,30
3 Quartil	--	0,30	0,30	0,45	--	0,30	0,95	1,00	0,50	0,65
Média	--	0,30	0,30	0,40	--	0,30	0,77	0,76	0,49	0,49
DP		0,00	0,00	0,10	--	0,00	0,26	0,30	0,26	0,23

Pretende-se desta forma disponibilizar ao utilizador final, dados estatísticos que permitam com base no conhecimento regional decidir no quadro da avaliação quantitativa do risco quais os valores de grau de perda mais adequados a utilizar podendo decidir de forma sustentada por uma perspetiva mais conservadora pela utilização de valores aproximados ao 3º quartil ou ao valor máximo ou decidir numa abordagem menos exigente por um valor médio de grau de perda. Apesar da incerteza existente no valor de grau de perda por tipologia de estrada e profundidade de superfície de rotura, os dados ajustam-se apenas de forma razoável às propostas de matriz de danos pré-existentes muito baseadas no conhecimento adquirido através de trabalho de campo (ver Tabela 5.7). Por exemplo no caso das estradas nacionais o grau de perda máximo surge no presente trabalho a partir de 2-2,5 m de profundidade de superfície de rotura, valor substancialmente inferior ao apresentado na Tabela 5.9 que é de 5 m. Para o efeito é de considerar possíveis limitações da base de dados utilizada neste trabalho, cujo reduzido número de registos para algumas classes de profundidade da superfície de rotura possam enviesar os resultados.

Tabela 5.9 - Matriz de danos por categoria de via, segundo a profundidade do deslizamento rotacional. (V1 - estrada rural; V2 - estrada regional; V3 - estrada nacional). Extraído de Garcia (2012).

Nível de danos		Magnitude do deslizamento por categoria de via		
		V1	V2	V3
D0	p (m)	<= 0,5	<= 0,5	<= 0,5
Danos insignificantes	A (m ²)	<= 350	<= 350	<= 350
D1	p (m)	= 0,5	= 1	= 1
Danos ligeiros	A (m ²)	= 350	= 700	= 700
D2	p (m)	...	...	...
Danos importantes	A (m ²)	...	...	...
D3	p (m)	...	...	= 3
Danos graves	A (m ²)	...	...	= 2100
D4	p (m)	= 1	= 3	= 5
Danos muito graves	A (m ²)	= 700	= 2100	= 3500

p (m) - profundidade do deslizamento ; A (m²) - área do deslizamento

5.3. AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE VERTENTE NA BACIA DO RIO GRANDE DA PIPA

A avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente na bacia do Rio Grande da Pipa foi efetuada tendo por base a construção de 10 modelos de suscetibilidade (Figura 5.21 e 5.22) definidos por tipo ou pela combinação de diferentes tipos de movimentos de vertente (Tabela 4.6, cf. Sect. 4.4).

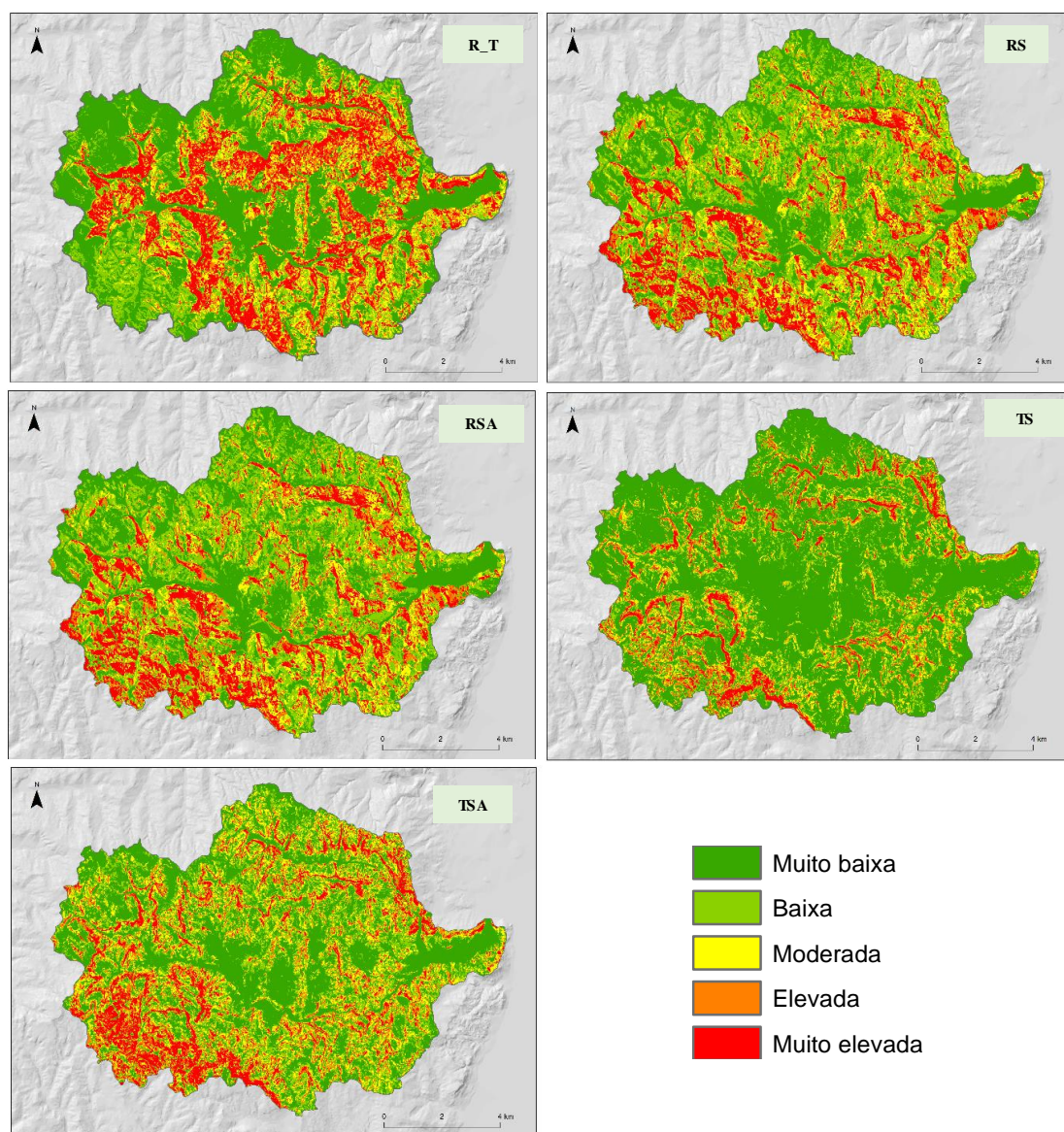


Figura 5.21 – Mapas de suscetibilidade a deslizamentos para a bacia do RGP. R_T – Deslizamentos rotacionais e translacionais; RS – Deslizamentos rotacionais superficiais; RSA – Deslizamentos rotacionais superficiais em talude; TS – Deslizamentos translacionais superficiais e TSA – Deslizamentos translacionais superficiais em talude.

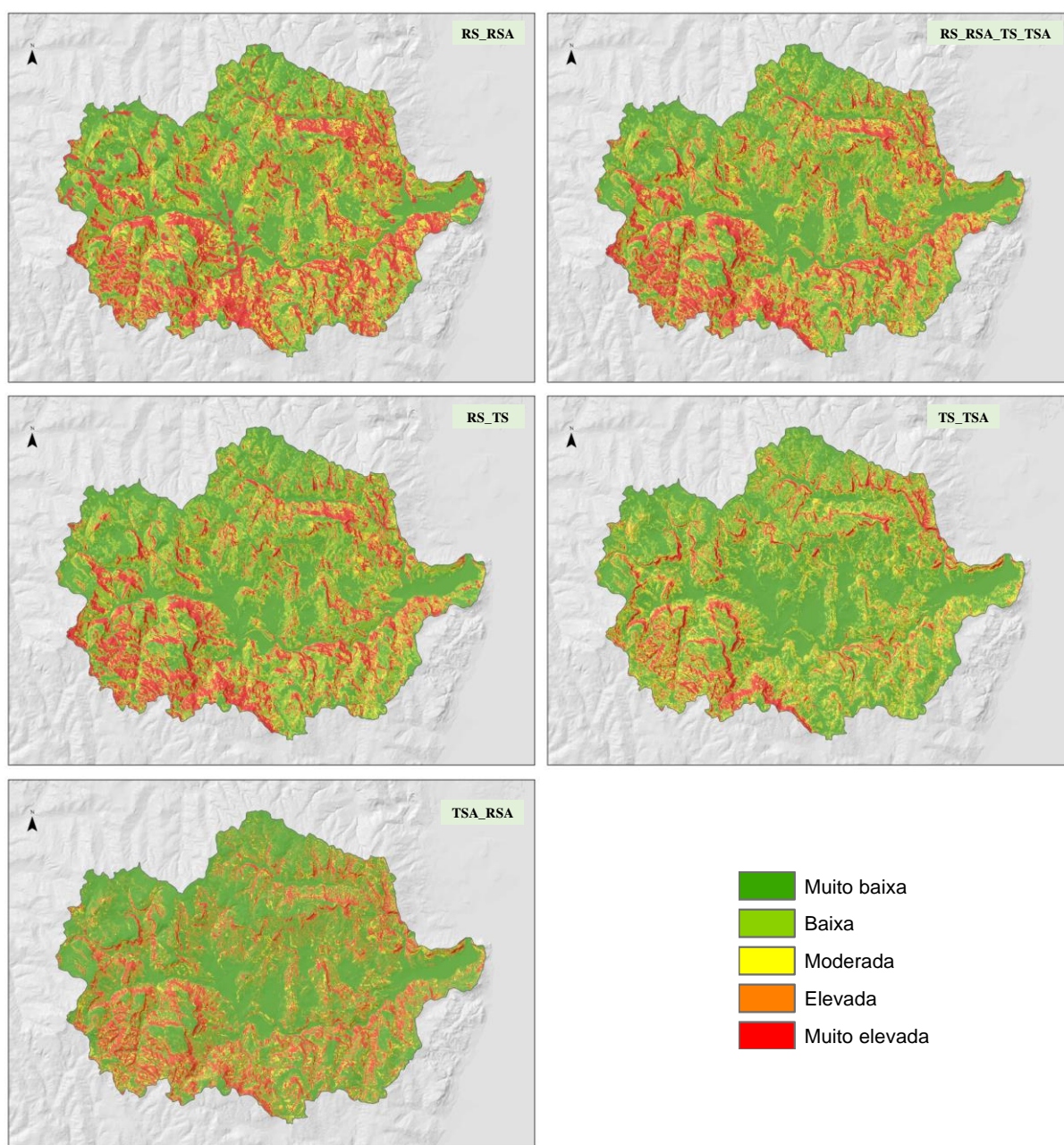


Figura 5.22 - Mapas de suscetibilidade a deslizamentos para a bacia do RGP. RS_RSA – Deslizamentos rotacionais superficiais e rotacionais superficiais em talude; RS_RSA_TS_TSA – Deslizamentos rotacionais e translacionais superficiais e deslizamentos rotacionais e translacionais superficiais em talude; RS_TS – Deslizamentos rotacionais e translacionais superficiais; TS_TSA – Deslizamentos translacionais superficiais e translacionais superficiais em talude; TSA_RSA – Deslizamentos translacionais e rotacionais superficiais em talude.

Quanto à validação dos modelos de suscetibilidade esta foi efetuada utilizando os mesmos movimentos de vertente utilizados para treinar o modelo e é expressa pelos respectivos valores de área abaixo das curvas de sucesso. Os melhores resultados foram obtidos quando os modelos de suscetibilidade foram treinados por tipo de deslizamento em vez de agrupados (Figura 5.23; Tabela 5.10). Todos os modelos de suscetibilidade, à exceção do modelo RS_RSA, podem ser classificados como aceitáveis a bons, de acordo com a classificação de Guzzetti, (2005), uma vez que atingiram valores da Área Abaixo da Curva (AAC) superiores a 0,75 ou entre 0,8 e 0,9, respetivamente.

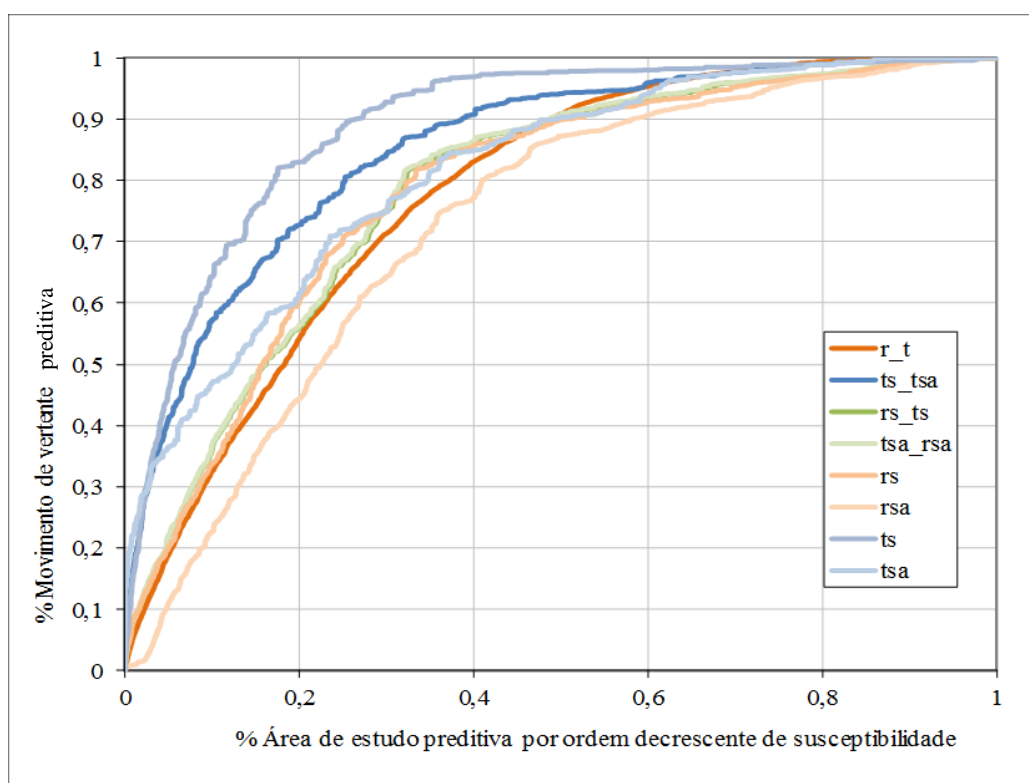


Figura 5.23 – Curva de sucesso por tipologia de modelo de suscetibilidade.

Ainda assim foram afastados das etapas subsequentes do trabalho, isto é, da avaliação da exposição a movimentos de vertente, os cinco modelos de suscetibilidade com piores resultados de AAC (Figura 5.23, Tabela 5.10), nomeadamente os modelos RS_RSA; RS_RSA_TS_TSA; RS_TS; TS_TSA e por último TSA_RSA (Figura 5.22). Os modelos treinados com grupos de deslizamentos de diferentes tipos por regra registam um pior ajuste do modelo do que quando treinados por um único tipo de movimento de vertente.

Tabela 5.10 – Área abaixo da curva (AAC) dos modelos de suscetibilidade a deslizamentos

Modelos de suscetibilidade	AAC	Modelos de suscetibilidade	AAC
R e T	0,778	TSA e RSA	0,788
RS e RSA	0,727	RS	0,784
RS, RSA, TS e TSA	0,77	RSA	0,784
RS e TS	0,786	TS	0,873
TS e TSA	0,85	TSA	0,814

Na Tabela 5.11 podem ser observados os *scores* de valor informativo de todas as classes de variáveis utilizadas para construir os cinco melhores modelos preditivos de suscetibilidade a deslizamentos para a bacia do RGP, modelos: R_T, RS, RSA, TS e TSA.

Tabela 5.11 – *Scores* de valor informativo por classe de variável utilizada como fator de predisposição a deslizamentos na bacia do RGP

	Variável / Modelo de suscetibilidade	R_T	RS	RSA	TS	TSA
Perfil transversal	Côncavo	0,1738	0,1788	0,1788	0,2332	0,1478
	Retilíneo/ área plana	0,0536	-0,0892	-0,0892	-0,622	-0,3011
	Convexo	-0,3071	-0,1313	-0,1313	0,1847	0,0961
Exposição	Plano	-2,8192	-2,0986	-2,0986	-3,3308	-2,4785
	N	-0,0072	0,5521	0,5521	0,4174	-0,2581
	NE	0,1645	0,5375	0,5375	0,2785	0,5525
	E	0,101	0,3954	0,3954	0,2678	0,0428
	SE	0,1037	-1,0972	-1,0972	-0,6046	0,0496
	S	0,3518	-1,6102	-1,6102	-1,0263	-0,9313
	SW	0,0864	-0,2055	-0,2055	-0,1136	-0,2421
	W	-0,5479	-0,2027	-0,2027	-0,0357	0,0565
	NW	-0,7729	-0,4683	-0,4683	-0,0225	0,001
Declive	0-2°	-3,0965	-2,1272	-2,1272	-3,1396	-2,2113
	2-5°	-2,3905	-1,8309	-1,8309	-3,3307	-2,4696
	5-10°	-0,1156	-0,3176	-0,3176	-2,7817	-0,9353
	10-15°	0,4901	0,4913	0,4913	0,1078	0,3052
	15-20°	0,5766	0,5869	0,5869	1,1915	0,8529
	20-25°	0,5667	1,0116	1,0116	1,8261	1,2959
	25-30°	0,6597	1,0891	1,0891	2,3078	2,0903
	30-35°	0,8772	1,2185	1,2185	2,8319	2,7419
	35-40°	1,085	1,576	1,576	2,6753	2,2192
	40-45°	1,2033	1,038	1,038	2,4958	-2,4785
	> 45°	1,2274	0,5454	0,5454	1,7637	-2,4785

(nas células a cinzento estão os valores de VI definidos quando $S_i = 0$)

Tabela 5.11 (continuação) – *Scores* de valor informativo por classe de variável utilizada como fator de predisposição a deslizamentos na bacia do RGP

	Variável / Modelo de suscetibilidade	R_T	RS	RSA	TS	TSA
Litologia	Aluviões – UI 1	-2,1137	-2,1165	-2,1165	-2,2323	-2,4785
	Conglomerados, arenitos e argilitos – UL 2	-5,0608	-2,6566	-2,6266	-3,3308	-2,4785
	Intercalações calcárias – UL 3	-5,0608	-2,6566	-2,6266	-3,3308	-2,4785
	Arenitos, margas e calcários – UL 4	-5,0608	-2,6566	-2,6266	-3,3308	-2,4785
	Calcários e margas – UL 5	-1,0983	0,5677	0,5677	0,4754	1,0744
	Pelitos, arenitos, margas e calcários – UL 6	-1,6533	-0,1805	-0,1805	0,0397	-0,0644
	Calcários corálicos – UL 7	-0,1371	-0,4724	-0,4724	0,4284	0,2522
	Calcários recifais – UL 8	-0,025	-2,6566	-2,6266	-3,3308	-0,6468
	Argilas, margas e arenitos – UL 9	0,3234	0,0935	0,0935	-0,1669	-0,2048
	Arcoses – UI 10	-5,0608	-2,6566	-2,6266	-3,3308	-2,4785
	Filões e massas vulcânicas – UL 11	-0,4059	1,4986	1,4986	-1,2244	-1,9543
Tipo de Solo	Cambissolo	0,2322	0,0977	0,0977	0,1077	0,0824
	Luvissolo	-0,7495	-0,5091	-0,5091	-0,1657	-1,0864
	Vertissolo	-1,4487	0,1835	0,1835	-1,9469	-0,6715
	Fluviossolo	-1,8042	-2,2816	-2,2816	-1,4354	-1,7599
	Castanozeme	-1,7784	1,9724	1,9724	0,1097	-2,4785
	Afloramento rochoso	0,9715	0,5599	0,5599	2,3757	3,0654
	Litossolo	-5,0608	-2,6566	-2,6266	-3,3308	-2,4785
	Cambissolo (litólico)	-5,0607	-2,6566	-2,6266	-3,3308	-2,4785
	Coluviossolo	-1,6862	-0,0184	-0,0184	1,1042	-2,4784
	Área Social	-1,5323	-1,2887	-1,2887	-3,1715	-0,1287
	Área urbana	-1,335	-2,6265	-2,6265	-1,8137	0,0365
Uso do Solo	Pedreira / Aterro	1,4148	-2,6566	-2,6266	-3,3308	4,9686
	Espaço Verde Agrícola	-5,0608	-2,6566	-2,6266	-3,3308	-2,4785
	Área agrícola	-0,0857	0,3478	0,3478	0,1305	0,1218
	Vinha	0,0151	0,2318	0,2318	-0,4927	-0,1399
	Pomar	-0,2069	-0,2704	-0,2704	-0,4506	-0,7904
	Floresta	0,0547	-0,0785	-0,0785	0,5219	-0,708
	Área agrícola heterogénea	-0,0506	-0,2767	-0,2767	-0,2854	-0,1075
	Mato e vegetação herbácea	0,7714	0,5317	0,5317	1,3125	0,8798
	Plano de água	-5,0608	-1,2096	-1,2096	-3,3308	-2,4785
	iwi_1	-1,8881	-1,5762	-1,5762	-1,0919	-1,0109
	iwi_2	-2,0933	-0,7401	-0,7401	-0,8976	-2,4785
IWI	iwi_3	-0,3594	-1,0881	-1,0881	-1,5212	-3,7174
	iwi_4	0,2452	-0,0194	-0,0194	-1,5726	-1,0651
	iwi_5	-0,0331	0,077	0,077	0,1702	0,1924
	iwi_6	-0,2496	-0,0517	-0,0517	0,8952	0,6986
	iwi_7	0,142	-0,1154	-0,1154	0,592	-2,4785

(nas células a cinzento estão os valores de VI definidos quando $S_i = 0$)

Através dos valores informativos de cada classe de cada variável assumida como fator de predisposição para a ocorrência de movimentos de vertente na bacia do RGP podemos isolar as combinações que mais potenciam em cada modelo de suscetibilidade a ocorrência de um tipo ou combinações de diferentes tipos de deslizamentos (Tabela 5.12). Ainda assim admite-se que as classes com muito pouca expressão espacial poderem indicar valores de suscetibilidade muito longe das reais como por exemplo o afloramento rochoso (no tipo de solo) ou a pedreira/aterro (uso do solo).

Tabela 5.12 – Combinações de fatores de predisposição mais favoráveis para a ocorrência de um tipo ou tipos de deslizamentos na bacia do RGP

	Perfil Transversal	Exposição	Declive	Litologia	Tipo de solo	Uso do solo	Iwi
R_T	Côncavo	Sul	> 35 °	UL 9	Afloramento rochoso	Pedreira/ Aterro, Mato e vegetação herbácea	Iwi_4
RS	Côncavo	Norte, Nordeste	20-45 °	UL 5, UL 11	Afloramento rochoso, Castanozeme	Mato e vegetação herbácea	Iwi_5
RSA	Côncavo	Norte, Nordeste	20-45 °	UL 5, UL 11	Afloramento rochoso, Castanozeme	Mato e vegetação herbácea	Iwi_5
TS	Côncavo	Norte	> 10 °	UL 5, UL 7	Afloramento rochoso, Coluviossolo	Mato e vegetação herbácea	Iwi_6, Iwi_7
TSA	Côncavo	Nordeste	20-40 °	UL 5	Afloramento rochoso	Pedreira/ Aterro, Mato e vegetação herbácea	Iwi_6

A área da bacia do RGP necessária para validar a área deslizada em cada classe de cada modelo de suscetibilidade encontra-se definida na Tabela 5.13. Regra geral, e com exceção da classe de suscetibilidade muito elevada verifica-se, da classe se suscetibilidade elevada para a classe de suscetibilidade muito baixa, um aumento da percentagem da área de estudo com a menor área deslizada que é necessário validar, o que atesta a razoabilidade dos modelos de suscetibilidade.

Tabela 5.13 – Área de estudo necessária para validar a percentagem de área deslizada definida em cada classe dos modelos de suscetibilidade a deslizamentos

% ÁREA DESLIZADA A VALIDAR	50 %	20 %	15 %	10 %	5 %
CLASSE DE SUSCETIBILIDADE	MUITO ELEVADA	ELEVADA	MODERADA	BAIXA	MUITO BAIXA
R_T	18,4	10,5	13,7	16,4	41
RS	15,8	9,2	13,8	30,7	30,5
RSA	22,6	11,4	12,6	27,3	26,1
TS	5,7	6,9	10	12,7	64,7
TSA	12,7	10,9	17,1	20,1	39,2

Posteriormente foram selecionadas as áreas classificadas com suscetibilidade elevada e muito elevada, tanto para os deslizamentos profundos (modelo R_T, Figura 5.24) como para os deslizamentos superficiais (modelos RS, RSA; TS e TSA, Figura 5.25). Estas áreas de suscetibilidade elevada e muito elevada quer para deslizamentos superficiais quer para os deslizamentos profundos são a base a utilizar para avaliar a exposição a deslizamentos na área de estudo. Na bacia do Rio Grande da Pipa a percentagem de área classificada como mais suscetível (classe de suscetibilidade elevada e muito elevada) é de 29 % (Figura 5.24) para os deslizamentos profundos e 29,3 % (Figura 5.25) para os deslizamentos superficiais. Já para área amostra que irá ser estudada na dissertação (área do concelho de Arruda dos Vinhos inserida na bacia do RGP) esta percentagem é ligeiramente inferior, sendo 25,3 % e 22,9 %, respetivamente.

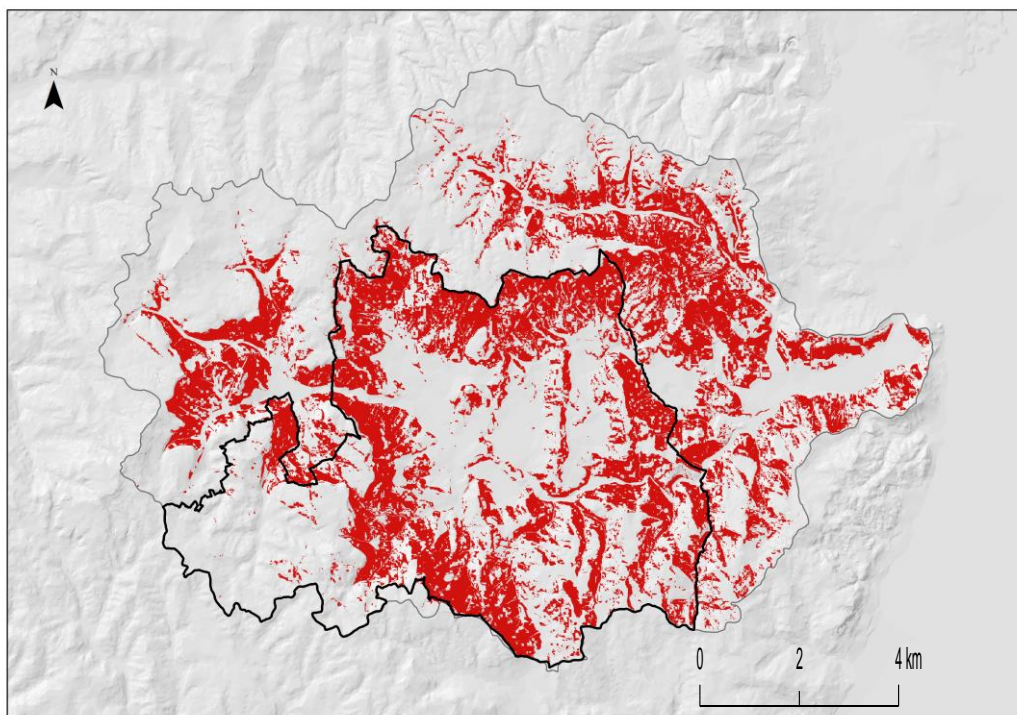


Figura 5.24 – Área classificada com suscetibilidade muito elevada e elevada a deslizamentos profundos (Modelo R_T).

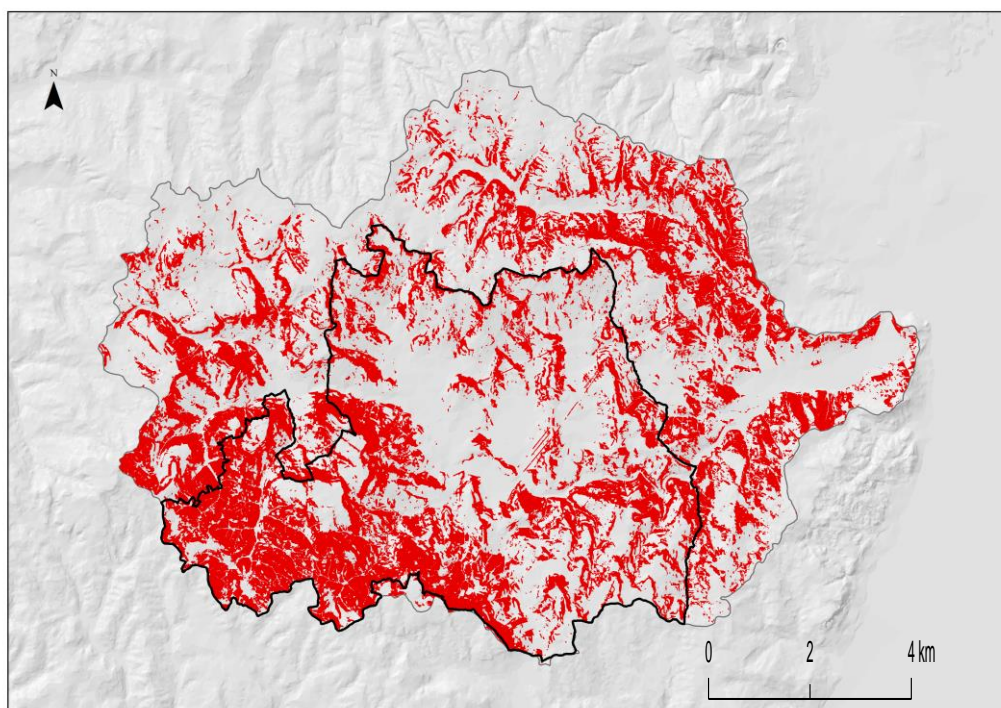


Figura 5.25 – Área classificada com suscetibilidade muito elevada e elevada a deslizamentos superficiais (Modelos RS, TS, RSA, TSA).

5.4 EXPOSIÇÃO A MOVIMENTOS DE VERTENTE E CENARIZAÇÃO DE EXPOSIÇÃO/PERDAS POTENCIAIS

Como descrito na metodologia a exposição a movimentos de vertente apenas será apresentada para a área do município de Arruda dos Vinhos pertencente à bacia do Rio Grande da Pipa, tendo por base dois cenários distintos, a exposição dos diferentes tipos de estradas e edifícios a deslizamentos profundos e deslizamentos superficiais. A exposição é definida pela presença dos elementos expostos nas áreas classificadas com suscetibilidade elevada e muito elevada a deslizamentos profundos (Figura 5.26 e 5.28) e pela presença dos elementos expostos nas áreas classificadas com suscetibilidade elevada a muito elevada a deslizamentos superficiais (Figura 5.27 e 5.29).

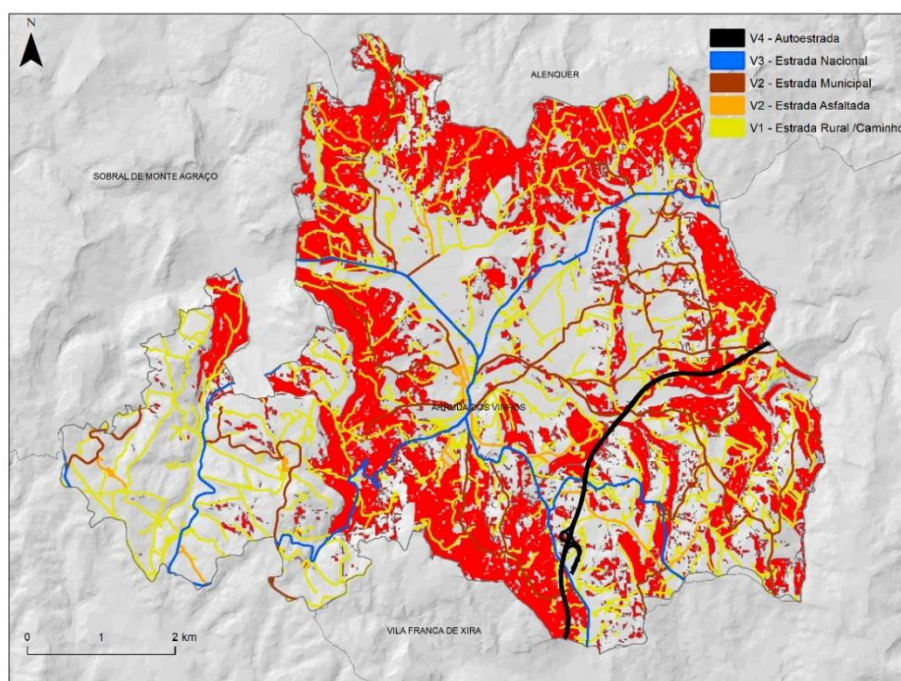


Figura 5.26 – Suscetibilidade elevada a muito elevada a deslizamentos profundos e distribuição dos diferentes tipos de estrada na área de estudo.

As perdas potenciais no caso das estradas podem ser inferidas através da leitura da Tabela 5.7, sendo que no caso dos diferentes tipos de estradas quando afetadas por deslizamentos profundos tendem a apresentar níveis de danos severos (D5). No caso de serem afetadas por deslizamentos superficiais pelo menos para estradas menos resistentes que as estradas nacionais os danos podem ser igualmente severos a comprovar pelos valores máximos de grau de perda registados. Nestas, o valor de grau de perda máximo para este tipo de deslizamentos superficiais parece rondar os 0,5, ainda assim potencialmente elevado.

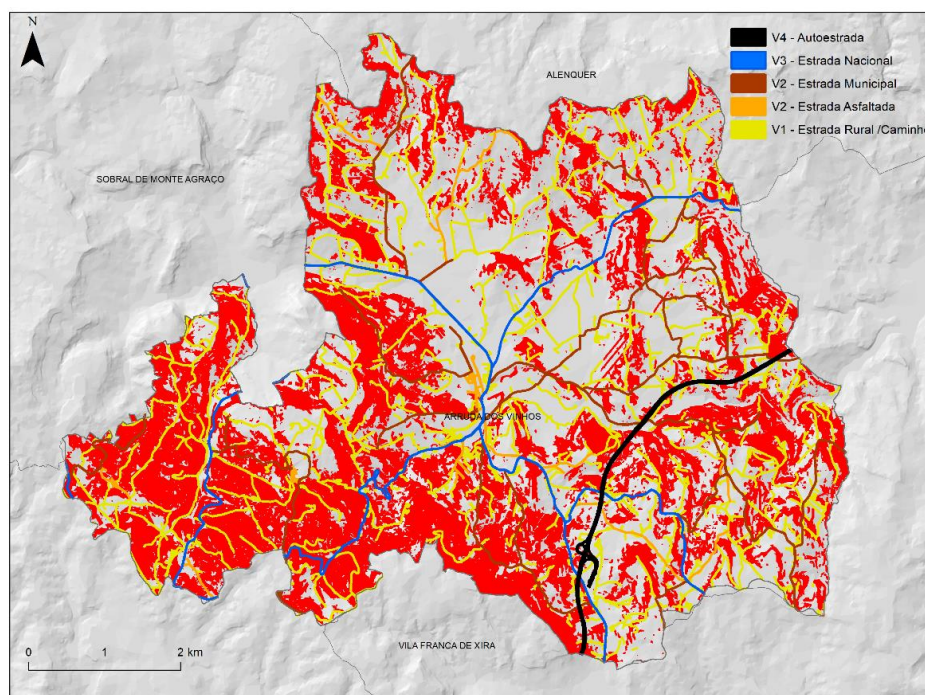


Figura 5.27 - Suscetibilidade elevada a muito elevada a deslizamentos superficiais e distribuição dos diferentes tipos de estrada na área de estudo.

A Tabela 5.14, sintetiza a exposição dos diferentes tipos de estradas a deslizamentos superficiais. Relativamente à exposição é possível verificar que 5.474,6 m (46,3%) do traçado da autoestrada (V4) se encontra localizado nas áreas classificadas com suscetibilidade elevada a muito elevada a movimentos de vertente superficiais. Importa realçar que os troços de autoestrada que estão sustentados por viadutos, e que possam ter sido classificados como expostos a deslizamentos superficiais, só estão realmente expostos se os seus pilares estiverem sustentados em áreas de suscetibilidade elevada a muito elevada. As estradas nacionais (V3) apresentam 7.221,3 m (26,5%), do seu traçado em áreas mais suscetíveis. As estradas asfaltadas (V2) com 15.491,9 m (24,1%) e as estradas rurais/caminhos (V1) com 66.486,4 m (29,7%).

A Tabela 5.15, sintetiza a exposição dos diferentes tipos de estradas a deslizamentos profundos. As autoestradas (V4) tem 4.005,5 m (36,3%) do seu traçado nestas áreas, as estradas nacionais (V3) com 8.377,2 m (30,3%), as estradas asfaltadas (V2) com 18.870,8 m (28,6%) e as estradas rurais/ caminhos (V1) com 74.973,3 m (33,1%).

Tabela 5. 14 – Exposição por tipologia de estrada a deslizamentos superficiais na área do município de Arruda dos Vinhos localizada na bacia do RGP

	Autoestrada (V4)			Estrada Nacional (V3)			Estrada Asfaltada (V2)			Estrada rural/Caminho (V1)		
	Não suscetível	Suscetível	% Suscetível	Não suscetível	Suscetível	% Suscetível	Não suscetível	Suscetível	% Suscetível	Não suscetível	Suscetível	% Suscetível
Comprimento (m)	6.342,3	5.474,6	46,3	19.995,50	7.221,3	26,5	48.862,9	15.491,9	24,1	157.501,4	66.486,4	29,7
Área (m²)	112.778,3	98.252,3	46,6	110.141,1	33.965,7	23,6	245.721,3	62.259,6	20,2	594.556	208.718,9	26

Tabela 5.15 - Exposição por tipologia de estrada a deslizamentos profundos na área do município de Arruda dos Vinhos localizada na bacia do RGP

	Autoestrada (V4)			Estrada Nacional (V3)			Estrada Asfaltada (V2)			Estrada rural/Caminho (V1)		
	Não suscetível	Suscetível	% Suscetível	Não suscetível	Suscetível	% Suscetível	Não suscetível	Suscetível	% Suscetível	Não suscetível	Suscetível	% Suscetível
Comprimento (m)	7.030,3	4.005,5	36,3	19.313,0	8.377,2	30,3	47.121,2	18.870,8	28,6	151.715,6	74.973,3	33,1
Área (m²)	144.805,9	66.222,3	31,4	106.172,8	37.761,3	26,2	225.295,3	82.640,9	26,8	572.677,5	229.623,3	28,6

No caso do edificado, através dos dados dos CENSOS de 2011 é possível determinar o número de edifícios de cada tipo por subsecção estatística (BGRI). Desta forma cruzando os mapas de suscetibilidade elevada a muito elevada a deslizamentos superficiais e a deslizamentos profundos é possível saber em cada subsecção estatística qual a fração de área suscetível a deslizamentos superficiais e profundos existente e dessa forma inferir o potencial de exposição desses elementos (Tabelas 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19). Para o efeito é determinada a frequência relativa de cada tipo de edifícios por subsecção estatística e esse valor é multiplicado pela frequência relativa de termos a área subsecção estatística classificada com suscetibilidade elevada a muito elevada. A exposição potencial traduz dessa forma quantitativamente por subsecção estatística a possibilidade de um determinado edifício de um determinado tipo poder estar incluído numa área de suscetibilidade elevada a muito elevada a deslizamentos superficiais e profundos.

As perdas potenciais no caso dos edifícios podem ser inferidas através da leitura da Tabela 5.9, sendo que os diferentes tipos de edifícios são particularmente vulneráveis aos deslizamentos profundos, podendo por esses sofrer níveis de danos severos (D5) ou a completa destruição da estrutura. No caso de serem afetadas por deslizamentos superficiais os danos tendem a ser substancialmente menos graves (D2) e o valor de grau de perda máximo para este tipo de deslizamentos ronda os 0,3.

Abaixo, são apresentados os resultados de exposição potencial por tipo de edificado com base nas subsecções estatísticas.

A Tabela 5.16 e Fig. 5.28 reporta a distribuição dos edifícios com “estrutura de betão armado”. Na área de estudo foram identificadas as 10 subsecções estatísticas com mais de 23 edifícios classificados de “estrutura de betão armado”. O número de edifícios varia entre 1 e 59 e a percentagem das BGRI classificada com maior suscetibilidade a deslizamentos superficiais entre 0 % e 71,3 % e a deslizamentos profundos varia entre 0 % e 45,6 %. O valor de exposição potencial varia entre 0 a 0,4 no caso dos movimentos de vertente profundos e 0 a 0,63 no caso dos movimentos de vertente superficiais.

Tabela 5.16 - Distribuição dos edifícios com “estrutura de betão armado” e área suscetível a deslizamentos superficiais e a deslizamentos profundos por subsecção estatística com mais de 23 edifícios desta tipologia.

ID	Área Amostra (m²) *	Estrut. de betão armado	Área suscetível MV profundos	% Suscetível MV Profundos	Susctib. Superficial (m²) *	% Susctib. Superficial *	Total edifícios	Prob edifício	Prob edif x prob área suscetibilidade mv profundos	Prob edif x prob área suscetibilidade mv superficiais
454	225453,3	59	23885,6	10,6	21659,9	9,6	64	0,92	0,10	0,09
398	18955,3	47	7184,3	37,9	809,1	4,3	48	0,98	0,37	0,04
456	72322,5	32	2980,2	4,1	12650,6	17,5	39	0,82	0,03	0,14
6	241799,6	31	22967,5	9,5	30762,0	12,7	45	0,69	0,07	0,09
390	22259,9	26	0	0	0	0	26	1,00	0,00	0,00
399	1584468,5	26	554573,1	35	864159,2	54,5	40	0,65	0,23	0,35
437	122893,8	26	11623,8	9,5	30842,2	25,1	29	0,90	0,08	0,23
438	20269	25	1451,9	7,2	3068,5	15,1	25	1,00	0,07	0,15
457	87539,9	24	0	0,00	0	0	27	0,89	0,00	0,00
119	111954,9	23	51061,8	45,6	79764	71,3	26	0,88	0,40	0,63

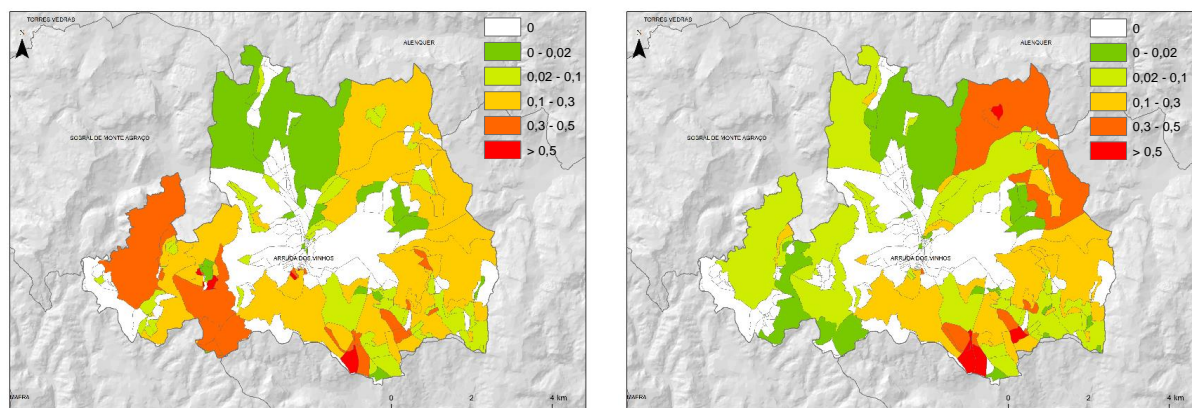


Figura 5.28 – Exposição potencial de edifícios de betão armado por subsecção estatística. Figura da esquerda para o cenário deslizamentos profundos e à direita para deslizamento superficiais.

A Tabela 5.17 reporta a distribuição dos edifícios com “estrutura de paredes de alvenaria com placa”. Na área de estudo foram identificadas 13 subsecções estatísticas com mais de 20 edifícios deste tipo. O número de edifícios varia entre 1 e 56 e a percentagem das BGRI classificada com maior suscetibilidade a deslizamentos superficiais entre 0 % e 76,1 % e a deslizamentos profundos varia entre 0 % e 68,6 %. O valor de exposição potencial varia entre

0 a 0,63 e 0 a 0,7 no caso dos movimentos de vertente profundos e superficiais, respetivamente.

Tabela 5.17 - Distribuição dos edifícios com “estrutura de parede de alvenaria com placa” e área suscetível a deslizamentos superficiais e a deslizamentos profundos por subsecção estatística com estatística com mais de 20 edifícios desta tipologia.

ID	Área Amostra (m²) *	Estrut. de paredes de alvenaria c/ placa	Área suscetível MV profundos	% Suscetível MV Profundos	Susctib. Superficial (m²) *	% Susctib. Superficial *	Total edifícios	Prob edifício	Prob edif x prob área suscetibilidade mv profundos	Prob edif x prob área suscetibilidade mv superficiais
537	4116768,8	56	865011,1	21	1755285,7	42,6	86	0,65	0,14	0,28
223	71174,5	49	0	0	0	0	49	1,00	0,00	0,00
415	2539078,4	39	983997,8	38,8	1587323,4	62,5	56	0,70	0,27	0,44
526	115718,1	32	0	0	0	0	33	0,97	0,00	0,00
580	2779414,2	29	1618846,6	58,2	1663198,5	59,8	53	0,55	0,32	0,33
581	78838,3	26	0	0	0	0	39	0,67	0,00	0,00
256	94036,8	26	0	0	0	0	31	0,84	0,00	0,00
441	15856,9	26	670,5	4,2	0	0	27	0,96	0,04	0,00
520	177678,6	24	2263,3	1,3	11336,7	6,4	29	0,83	0,01	0,05
574	12686,8	24	2313,2	18,2	0,1	0	25	0,96	0,18	0,00
624	165329,9	23	113477,9	68,6	125812,5	76,1	25	0,92	0,63	0,70
220	6669,8	22	246,9	3,7	174,6	2,6	22	1,00	0,04	0,03
283	371709,4	21	109508,4	29,5	149717,4	40,3	34	0,62	0,18	0,25

A Tabela 5.18 reporta a distribuição dos edifícios com “estruturas de paredes de alvenaria sem placa”. Na área de estudo foram identificadas 4 subsecções estatísticas com mais de 15 edifícios desta tipologia. O número de edifícios varia entre 1 e 26 e a percentagem das BGRI classificada com maior suscetibilidade a deslizamentos superficiais entre 0 % e 42,6 % e a deslizamentos profundos varia entre 0 % e 26,4 %. O valor de exposição potencial varia entre 0 e 0,2 e 0 a 0,19 no caso dos movimentos de vertente profundos e superficiais, respetivamente.

Tabela 5.18 - Distribuição dos edifícios com “estrutura de parede de alvenaria sem placa” e área suscetível a deslizamentos superficiais e a deslizamentos profundos por subsecção estatística com mais de 15 edifícios desta tipologia.

ID	Área Amostra (m²)	Estrut. de paredes de alvenaria s/ placa	Área suscetível MV profundos	% Suscetível MV Profundos	Susctib. Superficial (m²) *	% Susctib. Superficial *	Total edifícios	Prob edifício	Prob edif x prob área suscetibilida de mv profundos	Prob edif x prob área suscetibilida de mv superficiais
537	4116768,8	26	865011,1	21	1755285,7	42,6	86	0,30	0,06	0,13
453	2582089,6	20	681366,3	26,4	646833,4	25,1	26	0,77	0,20	0,19
481	3372,6	16	0	0	0	0	20	0,80	0,00	0,00
615	2520,9	16	14,8	0,6	0	0	18	0,89	0,01	0,00

A Tabela 5.19 reporta a distribuição dos edifícios com “Estrutura de paredes de adobe ou alvenaria de pedra solta”. Na área de estudo foram identificadas 7 subsecções estatísticas com este tipo de edifícios acima dos 10. O número de edifícios varia entre 1 e 21 e a percentagem das BGRI classificada com maior suscetibilidade a deslizamentos superficiais entre 0 % e 59,8 % e a deslizamentos profundos varia entre 3 % e 58,2 %. O valor de exposição potencial varia entre 0,03 a 0,23 e 0 a 0,24 no caso dos movimentos de vertente profundos e superficiais, respetivamente.

Tabela 5.19 - Distribuição dos edifícios com “Estrutura de paredes de adobe ou alvenaria de pedra solta” e área suscetível a deslizamentos superficiais e a deslizamentos profundos por subsecção estatística com mais de 10 edifícios desta tipologia.

ID	Área amostra (m²)	Estrut. de paredes de adobe ou alvenaria de pedra solta	Área suscetível MV profundos	% Suscetível MV Profundos	Susctib. Superficial (m²) *	% Susctib. Superficial *	Total edifícios	Prob edifício	Prob edif x prob área suscetibilida de mv profundos	Prob edif x prob área suscetibilida de mv superficiais
580	2779414,2	21	1618846,6	58,2	1663198,5	59,8	53	0,40	0,23	0,24
315	10130	20	2354,9	23,3	0	0	34	0,59	0,14	0,00
84	1755712,6	14	954881,9	54,4	931139,2	53	33	0,42	0,23	0,22
283	371709,4	12	109508,4	29,5	149717,4	40,3	34	0,35	0,10	0,14
369	138658,7	12	49564,5	35,8	35971,3	25,9	27	0,44	0,16	0,12
371	8067,1	12	237,9	3	0	0	13	0,92	0,03	0,00
45	341274,3	11	104525,8	30,6	107935,3	31,6	17	0,65	0,20	0,20

A Tabela 5.20 reporta a distribuição dos edifícios com “*outro tipo de estrutura*”. Na área de estudo foram identificadas 16 subsecções estatísticas com este tipo de edifícios. O número de edifícios é bastante reduzido variando entre 1 e 2 e a percentagem das BGRI classificada com maior suscetibilidade a deslizamentos profundos entre 6,7 % e 99,8 % e a deslizamentos superficiais varia entre 0 % e 96,5 %. O valor de exposição potencial varia entre 0 e 0,36 e 0 e 0,06 no caso dos movimentos de vertente profundos e superficiais, respetivamente.

Tabela 5.20 - Distribuição dos edifícios com “outro tipo de estrutura” e área suscetível a deslizamentos superficiais e a deslizamentos profundos por subsecção estatística

ID	Área amostra (m ²)	Edifícios com outro tipo de estrutura	Área suscetível MV profundos	% Suscetível MV Profundos	Susctib. Superficial (m ²) *	% Susctib. Superficial *	Total edifícios	Prob edifício	Prob edif x prob área suscetibilidade mv profundos	Prob edif x prob área suscetibilidade mv superficiais
48	153250,4	2	113378,2	74	0	0	28	0,07	0,05	0,00
54	45933,1	2	6200,8	11,3	4064,4	8,9	14	0,14	0,02	0,01
84	1755712,6	1	954881,9	54,4	931139,2	53	33	0,03	0,02	0,02
576	1209660,4	1	420330,1	34,8	212080,9	17,5	27	0,04	0,01	0,01
83	61849,5	1	5447	8,8	5683,5	9,2	27	0,04	0,00	0,00
298	264221,4	1	92070,7	34,9	109935,4	41,6	10	0,10	0,03	0,04
21	134926,8	1	72257,1	53,6	95999,8	71,2	26	0,04	0,02	0,03
601	51744,8	1	46412,5	89,7	49918,3	96,5	19	0,05	0,05	0,05
85	119555,7	1	65622,2	54,9	17928,3	15	10	0,10	0,05	0,01
162	26207,8	1	3617,6	13,8	1263,1	4,8	5	0,20	0,03	0,01
415	2539078,4	1	983997,8	38,8	1587323,4	62,5	56	0,02	0,01	0,01
66	52923	1	3535,2	6,7	37600,1	71,1	12	0,08	0,01	0,06
25	1191702	1	1189306,9	99,8	67244,4	5,6	8	0,13	0,12	0,01
379	83672,1	1	15706,6	18,8	8360,8	10	2	0,50	0,09	0,05
444	91796,9	1	37490,3	40,8	25823,4	28,1	11	0,09	0,04	0,03
251	29188,1	1	20889,5	71,6	0	0	2	0,50	0,36	0,00

A avaliação da exposição dos edifícios a deslizamentos profundos e a deslizamentos superficiais considerando a localização exata de cada elemento na área de estudo é apresentada nas Figuras 5.29 e 5.30, respetivamente. Por dificuldade em estabelecer edifício a edifício a que tipo pertence, optou-se por apresentar a exposição simplesmente para os edifícios, estufas e outros elementos classificados como Elementos vitais, estratégicos e sensíveis de acordo com a proposta de Julião *et al.* (2009). Na Tabela 5.21 é sintetizado o nível de exposição que estes elementos têm na área de estudo a deslizamentos profundos e a

deslizamentos superficiais. Em pormenor, estão expostos em áreas de elevada a muito elevada suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos profundos: os postos de transformação com 40%, as estufas com 28,6%, as áreas de serviço com 25%, edifícios (casas) com 18,9% e as igrejas/ capelas com 5,3% tendo o resto um valor nulo. No caso da exposição a deslizamentos superficiais destacam-se: as estufas com 71,4%, as áreas de serviço com 25%, as vivendas com 12,3%, as escolas/ jardins de infância com 10% e por último as fábricas com 3,1% tendo o resto o valor de 0%.

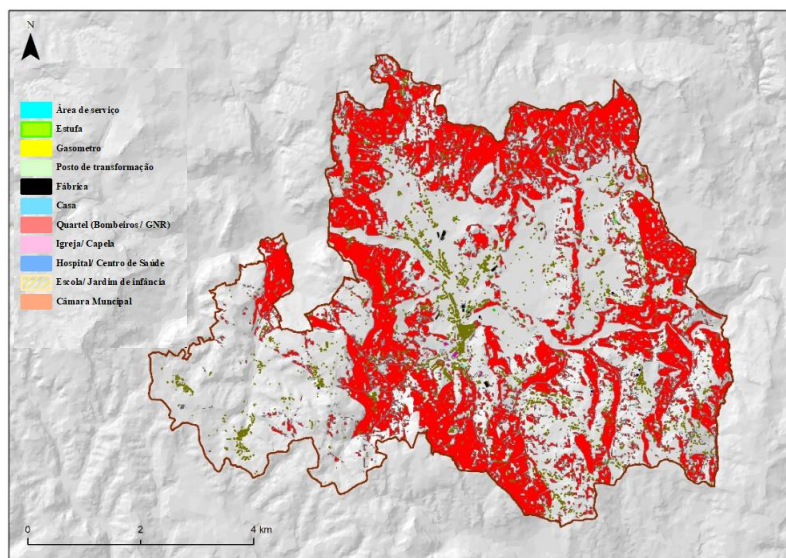


Figura 5.29 - Suscetibilidade a movimentos de vertente profundos e os elementos expostos: edifícios, estufas e outros elementos classificados como vitais estratégicos e/ou sensíveis.

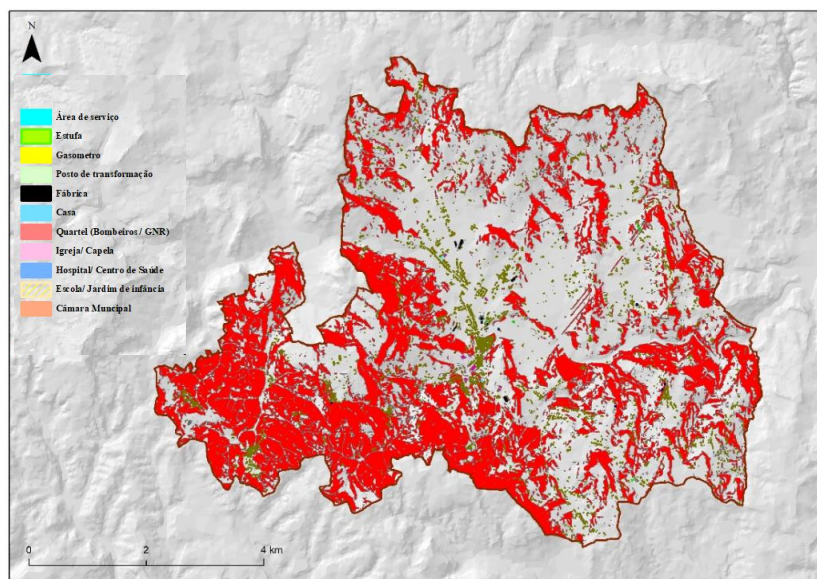


Figura 5.30 - Suscetibilidade a movimentos de vertente superficiais e elementos expostos: edifícios, estufas e outros elementos classificados como vitais estratégicos e/ou sensíveis.

Tabela 5.21 – Número de edifícios, estufas e outros elementos classificados como vitais estratégicos e/ou sensíveis expostos a deslizamentos profundos e superficiais

	TOTAL	Suscetibilidade a movimentos de vertente profundos		Suscetibilidade a movimentos de vertente superficiais	
		Número afetado	Porcentagem afetada	Número afetado	Porcentagem afetada
Área de Serviço	4	1	25	1	25
Estufa	7	2	28,6	5	71,4
Gasómetro	1	0	0	0	0
Posto de transformação	5	2	40	0	0
Fábrica	32	2	6,3	1	3,1
Vivenda	4848	918	18,9	594	12,3
Quartel	5	0	0	0	0
Igreja	19	1	5,3	0	0
Hospital/ Centro de Saúde	2	0	0	0	0
Escola/ Jardim de Infância	10	0	0	1	10
Câmara Municipal	1	0	0	0	0

Esta dissertação teve como principal objetivo explorar a existência de padrões de vulnerabilidade estrutural em estradas e edifícios gerados pelo impacto de movimentos de vertente do tipo deslizamento. Como ponto de partida foi utilizado um inventário de aproximadamente 400 deslizamentos que causaram danos em estradas (356 deslizamentos) e edifícios (42 deslizamentos) na bacia do Rio Grande da Pipa, Arruda dos Vinhos (Oliveira, 2012). A avaliação da vulnerabilidade física de estradas e edifícios a deslizamentos na área de estudo teve por base a análise de um conjunto de fatores que se assume condicionarem o grau de perda do elemento exposto, como sejam: (i) a resistência estrutural do elemento afetado; (ii) o tipo de movimento de vertente; (iii) a magnitude/intensidade do movimento de vertente; (iv) a espessura do material deslizado ou a profundidade da superfície de rotura como *proxy* da intensidade, ou (v) a forma como a massa instabilizada afeta a infraestrutura.

Neste contexto foram definidas duas hipóteses de trabalho:

H1 - A utilização de tipologias de danos sustentadas num conjunto de critérios mensuráveis e marcadores únicos de deformação, permite determinar objetivamente o grau de perda em estradas e edifícios afetadas/os por movimentos de vertente com um razoável ajuste às relações empíricas em uso regionalmente.

H2 – A existência de um inventário de movimentos de vertente que geraram danos em estradas e edifícios na bacia do Rio Grande da Pipa, permite determinar padrões de deformação estrutural através das relações entre a intensidade/magnitude dos movimentos de vertente, a resistência estrutural de estradas e edifícios e o grau de perda desses elementos expostos.

Numa primeira etapa foi desenvolvida uma nova proposta para determinação do grau de perda em estradas e edifícios (abordagem GrauPerda2) contemplando uma diferenciação em dez classes de grau de perda/nível de danos ajustados a um intervalo de classe de 0,1. A proposta foi sustentada em critérios que foram alvo de quantificação ou os elementos que passaram a corresponder a marcadores únicos de deformação/perda de funcionalidade. No caso das estradas considerou-se: (i) a abertura de fissuras/fendas de tração no pavimento da via; (ii) o desnível vertical de fraturas no pavimento da via (iii) a amplitude de ondulação do pavimento da via; (iv) o tempo de interrupção/condicionamento da circulação; e (v) a perda de resistência do suporte lateral da estrada em aterro. No caso dos edifícios foram utilizados: (i) a abertura e

desnível lateral em fendas/ fraturas; (ii) a acumulação de material; (iii) a perda de funcionalidade. Os diferentes critérios e marcadores únicos de deformação utilizados para determinar o grau de perda foram cruciais para o presente trabalho, não se colocando de parte algum enviesamento que essas assunções, justificadas, possam ter nos resultados obtidos. Pela confrontação dos resultados de grau de perda obtidos com esta nova proposta com o grau de perda determinado pela abordagem mais empírica em uso na região a norte de Lisboa, constatou-se que a relação entre o grau de perda e a magnitude dos deslizamentos não difere significativamente, apesar de graus de perda ligeiramente inferiores na abordagem GrauPerda2 quando comparada com Grau de Perda1. Estes resultados evidenciam um razoável ajuste da presente proposta aos critérios mais subjetivos, que têm sido utilizados para determinar qualitativamente a vulnerabilidade das estradas e edifícios à ocorrência regional de movimentos de vertente, validando razoavelmente a hipótese H1.

As relações entre a intensidade/magnitude dos movimentos de vertente e grau de perda foram exploradas de forma a contemplar quer a resistência estrutural do elemento afetado (diferentes tipos de estradas e edifícios) quer os impactos originados pelos diferentes setores dos deslizamentos (cicatriz, área de depleção, área de acumulação, frente/pé do deslizamento). Na magnitude, é possível observar a relação com a área e profundidade onde a melhor relação foi estabelecida por regressão potencial, sendo a que apresentou melhores valores de correlação expressos por r^2

No caso das estradas, foi possível observar uma ligeira tendência independentemente do tipo/resistência da estrada para um aumento do grau perda em função do aumento da magnitude (volume) dos deslizamentos. Esta tendência, tende, no entanto, a esbater-se com o aumento da resistência estrutural das estradas. No caso dos edifícios os resultados são muito menos conclusivos, sendo que apenas nos casos dos edifícios com pedra de adobe ou taipa a tendência para um aumento do grau de perda com o aumento do volume dos deslizamentos se parece confirmar. O registo de danos em edifícios na bacia do RGP é bastante reduzido o que potencia a falta de consistência na determinação de padrões de deformação estrutural para este tipo de elementos.

Quando explorada a relação entre grau de perda e volume dos deslizamentos por setor do deslizamento que origina os danos em estradas e edifícios foi possível observar que foi na área de depleção (B2/R2), na área de acumulação (B3/R3) mas também na cicatriz (B1/R1) que os deslizamentos causam maior grau de perda. Esse facto pode ser parcialmente explicado pela

geometria dos deslizamentos rotacionais que predominantemente ocorrem na bacia do RGP. O maior grau de perda em estradas e edifícios é originado por deslizamentos com volumes entre 100 m^3 a $1.000.000 \text{ m}^3$ no caso das estradas e acima de 10.000 m^3 no caso dos edifícios. Nestes casos, são características descidas abruptas do “solo” na área imediatamente abaixo da cicatriz B1/R1 (área de depleção, B2 e R2) e movimentos verticais do “solo”, a jusante, acima da superfície topográfica (área de acumulação, B3 e R3). No corpo do deslizamento, muitas vezes na área que separa a área de depleção da área de acumulação sobretudo no caso dos movimentos de vertente de maior dimensão, o grau de perda registado foi tipicamente baixo sobretudo nos edifícios devido ao facto da rotação do material deslizado nesta área se fazer sem grande deformação interna. Na frente/pé dos deslizamentos os danos registados foram relativamente inferiores, muito porque reportaram a depósitos de material acima deslocados para cima das estradas ou porque quase não existem registos no caso dos edifícios. Estes dados permitem validar parcialmente a hipótese H2.

A avaliação da incerteza relativamente à relação entre a profundidade da superfície de rotura e o grau de perda verificado quer em estradas quer em edifícios foi explorada pela resistência estrutural do elemento afetado. De uma forma geral, no caso das estradas, é possível constatar uma considerável dispersão de valores de grau de perda em função de uma qualquer intensidade de deslizamento, ainda que se note a ligeira tendência para o aumento do grau de perda com o aumento da intensidade dos deslizamentos e com a diminuição da resistência estrutural do elemento afetado. A existência de valores máximos de deformação (grau de perda de 1), eventualmente *outliers*, provocados por deslizamentos com menor profundidade da superfície de rotura, como seja no caso das estradas asfaltadas, ou a inexistência de dados para muitas classes de intensidade, leva à necessidade de aumento de registos na base de dados. No caso dos edifícios, é perceptível a falta de registos de danos, que dificulta a análise da dispersão dos valores de grau de perda em função da profundidade dos deslizamentos, ainda assim é maior para profundidades da superfície de rotura acima de 3 m.

Pela elaboração de curvas de fragilidade apenas para o caso das estradas foi possível verificar que a probabilidade de excedência de um qualquer valor de grau de perda tende a aumentar com o aumento da profundidade da superfície de rotura do deslizamento e que a probabilidade de um determinado nível de danos (grau de perda) ser excedido diminui na direção do aumento do nível de danos.

Relativamente às matrizes de vulnerabilidade a opção foi considerar os seguintes valores de grau de perda por classe de profundidade de superfície de rotura: máximo, mínimo, médio, mediana, 1º quartil, 3º quartil e desvio-padrão (DP) de forma a disponibilizar ao utilizador final, dados estatísticos que permitam com base no conhecimento regional decidir no quadro da avaliação quantitativa do risco quais os valores de grau de perda mais adequados a utilizar.

As áreas classificadas com suscetibilidade elevada e muito elevada na área do município de Arruda dos Vinhos incluída na bacia do RGP foram seleccionadas para avaliar a exposição a deslizamentos na área de estudo. Foram considerados dois cenários de exposição, a áreas de elevada suscetibilidade a deslizamentos profundos e a deslizamentos superficiais. As perdas potenciais no caso das estradas quando afetadas por deslizamentos profundos tendem a apresentar níveis de danos severos (D5) e no caso de deslizamentos superficiais (grau de perda até 0,5).

Os edifícios, são particularmente vulneráveis aos deslizamentos profundos, podendo por esses sofrer níveis de danos severos (D5) e a completa destruição da estrutura. No caso de serem afetadas por deslizamentos superficiais os danos tendem a ser substancialmente menos graves (D2). Para além da identificação da exposição dos edifícios e outros elementos considerados estratégicos, vitais e sensíveis foi explorada com base na distribuição dos diferentes tipos de edifícios por subsecção estatística a possibilidade de determinar/hierarquizar na área de estudo a exposição potencial através de probabilidades (probabilidade dos edifícios * probabilidade da área suscetível). Esta, traduz de forma quantitativamente a possibilidade de um determinado edifício de um determinado tipo poder estar incluído numa área de suscetibilidade elevada a muito elevada a deslizamentos superficiais e profundos.

Relativamente a problemas ou limitações de trabalho salienta-se: o tempo limitado para o levantamento da tipologia e funcionalidade de todos os edifícios e de todos os elementos considerados como EEVS para a bacia do RGP; a falta de dados relativos às características dos edifícios com danos na bacia do RGP; e a verificação detalhada sobre se os *outliers* de grau de perda estão associados a algum tipo de movimento de vertente específico.

Quanto a trabalhos futuros seria interessante analisar, se a abordagem Grau de Perda² difere significativamente de outras metodologias utilizadas noutras áreas de estudo quer com contextos geológico/geomorfológico similares, quer noutras regiões expostas a fenómenos naturais ou contextos geomorfológicos diferentes (*e.g.*, Itália; Áustria, Alemanha: movimentos de vertente, avalanches).

A

Alexander, D. E. (1989). Urban landslides. *Progress in Physical Geography* 13, 157–191.

Alexander, D. E. (2000). Landslide risk estimation in Umbria Region. Unpublished technical report for the CNR-IRPI.

Alexander, D. E. (2004). Vulnerability to landslide in Glade, T; Anderson M.; Crozier, M. (eds.) *Landslide Hazard and Risk*. Wiley, Chichester, 175-198.

Antronico, L.; Borrelli, L.; Coscarelli, R.; Gullà, G. (2015). Time evolution of landslide damages to buildings: the case study of Lungro (Calabria, southern Italy). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* (2015) 74:47–59.

B

Baeza, C.; Lantada, N.; Moya, J. (2010). Influence of sample and terrain unit on landslide susceptibility assessment at La Pobla de Lillet, Eastern Pyrenees, Spain. *Environmental Earth Sciences*. 60: 155 – 167.

Baggio, C.; Bernardini, A.; Colozza, R.; Corazza, L.; Della Bella M.; Di Pasquale, G.; Dolce, M.; Goretti, A.; Martinelli, A.; Orsini, G.; Papa, F.; Zuccaro, G. (2007). Field manual for post-earthquake damage and safety assessment and short term countermeasures (AeDES). JRC Scientific and Technical Reports, European Commission, EUR 22868 EN, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen, Luxembourg, 81.

Bell, R.; Glade, T. (2004). Quantitative risk analysis for landslides – Examples from Búldalur, NW-Iceland. *Natural Hazards Earths System Sciences* (2004) 4: 117–131.

Birkmann, J. (2006). Measuring vulnerability to natural hazards : towards disaster resilient societies. October, 01(October), xxvi, 524 p., [24] p. of plates. <http://doi.org/10.1111/j.1539-6975.2010.01389.x>.

Birkmann, J.; Wisner, B. (2006). Measuring the un-measurable. The challenge of vulnerability. Studies of the University: Research, Counsel, Education-Publication Series of UNU-EHS, No. 5/2006.

Blong, R. J. (2003). Building damage in Rabaul Papua New Guinea 1994. Bulletin Volcanol. 65:43–54.

Bonachea, J.; Remondo, J.; Cendrero, A. (2004). Evaluación y cartografía de riesgo de deslizamientos a partir del análisis de los movimientos ocurridos en el pasado reciente y de sus efectos in Benito, G.; Herrero, A. D.(Eds.) Riesgos naturales y antrópicos en geomorfología. VIII Reunión Nacional de Geomorfología. Vol. II. Sociedad Española de Geomorfología. Madrid: 423 – 434.

Buckle, P.; Mars, G.; Smale, S. (2000). New approaches to assessing vulnerability and resilience. Aust J Emerg Manag. 8–14.

C

Cardinali, M.; Reichenbach, P.; Guzzetti, F.; Ardizzone, G.; Galli, M.; Cacciano, M.; Castellani, M.; Salvati, P. (2002). A geomorphological approach to estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. Natural Hazards Earths System Sciences. 2: 57 – 72.

Cavalheiro A.; Leite A. (2001). Movimento de terras em Covas do Douro - Sabrosa (relatório preliminar).

Ciurean, R. L.; Schröter, D.; Glade, T. (2013). Conceptual Frameworks of Vulnerability Assessments for Natural Disasters Reduction, in Approaches to Disaster Management – Examining the Implications of Hazards, Emergencies and Disasters, edited by: Tiefenbacher, J., InTech, Rijeka, 3–32, 2013.

Ciurean, R. L.; Hussin, H.; van Westen, J.; Jaboyedoff, M.; Nicolet, P.; Chen, L.; Frigerio, S.; Glade, T. (2017). Multi-scale debris flow vulnerability assessment and direct costs estimation of buildings in the Eastern Italian Alps. Natural Hazards, 85: 929-957.

Clerici, A.; Perego, S.; Tellini, C.; Vescovi, P. (2010). Landslide failure and runout susceptibility in the upper T. Ceno valley (Northern Apennines, Italy). *Natural Hazards Earths System Sciences* 52, 1–29. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9349-4>.

CROW (1998). ASVV – Recommendations for traffic provisions in built-up áreas. Record 15.

Crozier M. J.; Glade T. (2005). Landslide hazard and risk: issues, concepts, and approach in Glade T, Anderson M, Crozier MJ (eds) *Landslide hazard and risk*. Wiley, New York, 1-40.

Coelho, A. (1979). Engineering geological evaluation of slope stability for urban planning and construction. *Bulletin of International Association of Engineering Geology* n. °19, 75-78, Krefeld, 1979.

Corominas, J.; van Westen, C.; Frattini, P.; Cascini, L.; Malet, J.P.; Fotopoulou, S.; Catani, F.; Van Den Eeckhaut, M.; Mavrouli, O.; Agliardi, F.; Pitilakis, K.; Winter, M.G.; Pastor, M.; Ferlisi, S.; Tofani, V.; Hervás, J.; Smith, J.T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 73 (2), 209–263.

Cruden, D. M.; Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes in Turner, A. K.; Schuster, R. L. (Eds.), *Landslides investigation and mitigation*. Transportation Research Board. National Academic Press, Washington D. C. Special Report 247: 36 – 75.

Cutter, S. L. (1996). Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography* 20,4, 529-539.

D

Dai, F. C.; Lee, C. F.; Ngai, Y. Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview, *Engineering Geology*, 64, 65–87, 2002.

Dall’Osso, F.; Gonella, M.; Gabbianelli, G.; Withycombe, G.; Dominey-Howes, D. (2009). A revised (PTVA) model for assessing the vulnerability of buildings to tsunami

damage, *Natural Hazards Earths System. Sciences*, 9, 1557–1565, doi:10.5194/nhess-9-1557-2009, 2009

DGV, (2004). *Instalação e Sinalização de Lombas Redutoras de Velocidade – Nota técnica*, Despacho n.º 109/2004, Direção dos Serviços de Trânsito.

Douglas, J. (2007). Physical vulnerability modeling in natural hazard risk assessment. *Natural Hazards Earths System Sciences* 7:283-288.

E

Estradas de Portugal, *Caderno de Encargos Tipo Obra 16.03 - Pavimentação*. Fevereiro, 2009

Etkin, D.; Stefanovic, I. L. (2005). Mitigation natural disasters: The role of eco-ethics. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 10:467-490.

Ettinger, S.; Mounaud, L.; Magill, C.; Yao-Lafourcade, A.-F.; Thouret, J.-C.; Manville, V.; Negulescu, C.; Zuccaro, G.; De Gregorio, D.; Nardone, S.; Uchuchoque, J.; Arguedas, A.; Macedo, L.; Llerena, N. (2016). Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. *Journal of Hydrology*, 541, 563–581.

F

Fell, R.; Harthford, D. (1997). Landslide risk management in Cruden D. e Fell, R. (eds), *Landslide Risk Assessment*: 51 – 109. Rotterdam: Balkema.

Fell, R.; Ho, K. K. S.; Lacasse, S.; Leroi, E. (2005). A framework for landslide risk assessment and management. *Landslide Risk Management*, 3–25.

Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*. 102: 85 - 98.

Ferreira, A. B. (1984). Mouvements de terrain dans la region au nord de Lisbonne. Condition morphostructurales et climatiques, in *Mouvements de terrain*, 485–494, Paris, 1984.

Ferreira, A.B.; Zêzere, J.L. (1997). Portugal and the Portuguese Atlantic Islands. Eds. Clifford Embleton, Christine Embleton-Hamann, *Geomorphological Hazards of Europe, Developments in Earth Surface Processes*, Volume 5, 1997, 391-407.

Flageollet JC (1999). Landslide hazard—a conceptual approach to risk viewpoint in Casale R, Margotti C (eds) *Floods and landslides: integrated risk assessment*. Springer, Berlin, 3–18.

Fuchs, S.; Heiss, K.; Hübl, J. (2007). Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Natural Hazards Earths System Sciences*. 7 (5), 495-506.

Fuchs, S. (2009). Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria - paradigms of vulnerability revisited, *Natural Hazards Earths System Sciences*, 9, 337-352, <https://doi.org/10.5194/nhess-9-337-2009>, 2009.

Fuchs, S.; Keiler, M.; Zischg, A. (2015). A spatiotemporal multi-hazard exposure assessment based on property data. *Natural Hazards Earths System Sciences* 15(9):2127–2142. doi:10.5194/nhess-15-2127-2015.

G

Garcia, R. A. C. (2002). Avaliação do Risco de Movimentos de Vertente na Depressão da Abadia (Torres Vedras). Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Ambiente a apresentar ao Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Garcia, R. A. C. (2012). Metodologias de Avaliação da Perigosidade e Risco associado a movimentos de vertente. Aplicação na bacia do rio Alenquer. Dissertação de doutoramento em Geografia na Especialidade em Geografia Física no Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Glade, T. (2003). Vulnerability Assessment in Landslide Risk Analysis. *Die Erde*.

Glade, T.; Anderson, M.G.; Crozier, M.J. (Eds.), (2005). *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester.

Godfrey, A.; Ciurean, R. L.; van Westen, C. J.; Kingma, N. C.; Glade, T. (2015). Assessing vulnerability of buildings to hydro-meteorological hazards using an expert based approach – An application in Nehoiu Valley, Romania. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 13 (December), 229–241. <http://doi.org/10.1016/j.ijdr.2015.06.001>.

Guillard-Gonçalves, C.; Zêzere, J. (2012). Landslide susceptibility assessment and validation in the framework of municipal planning in Portugal: the case of Loures Municipality, *Environment Management*, 50, 721–735, doi:10.1007/s00267-012-9921-7, 2012.

Guillard-Gonçalves, C.; Cutter, S. L.; Emrich, C. T.; Zêzere, J. L. (2015). Application of Social Vulnerability Index (SoVI) and delineation of natural risk zones in Greater Lisbon, Portugal, *J. Risk Res.*, 18, 651–674, doi:10.1080/13669877.2014.910689, 2015.

Guillard-Gonçalves, C.; Zêzere, J. L.; Pereira, S.; Garcia, R. A. C. (2016). Assessment of physical vulnerability of buildings and analysis of landslide risk at the municipal scale: application to the Loures municipality, *Portugal Natural Hazards Earths System Sciences*, 16, 311–331, 2016.

Guzzetti, F.; Carrara, A.; Cardinali, M.; Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*. 31: 181 – 216.

Guzzetti, F. (2005). *Landslide hazard and risk assessment*. Dissertation zur erlangung des doktorgrads (Dr. Rer. Nat.) der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Italy.

Guzzetti, F.; Ardizzone, F.; Cardinali, M.; Rossi, M.; Valigi, D. (2009). Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*. 279: 222 – 229.

H

HAZUS-MH (2003). Multi-hazard loss estimation methodology, earthquake model, technical manual developed by Department of Homeland Security Emergency Preparedness and Response Directorate FEMA Mitigation Division, Washington, DC.

HAZUS-MH (2010). FEMA's methodology for estimating potential losses from disasters.

Hugget, R.J. (2007). Fundamentals of Geomorphology. London: Routledge, Taylor and Francis Group. 2007. 483.

Hungr, O. E; Evans, S. G. (1997). A dynamic model for landslides with changing mass. In Marinos, P. G.; Koukis, G. C.; Tsiamboas, G. C.; e Stournaros, G. C. (Editors), Proceedings, IAEG International Symposium on Engineering Geology and the Environment, Athens, Vol. 1, 719-724.

I

IAEG-Commission on Landslides, 1990. Suggested nomenclature for landslides. Bulletin of the International Association of Engineering Geology 41, 13–16.

Iverson, R. M.; Reid, M. E.; Lahusen, R. G. (1997). Debris-flow mobilization from landslide 1, 85-138.

J

Jaedicke, C.; Van Den Eeckhaut, M.; Nadim, F.; Hervás, J.; Kalsnes, B.; Vangelsten, B. V.; Smith, J.T.; Tofani, V.; Ciurean, R.; Winter, M.G.; Sverdrup-Thygeson, K.; Syre, E.; Smebye, H. (2014). Identification of landslide hazard and risk “hotspots” in Europe. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73(2), 325–339. <http://doi.org/10.1007/s10064-013-0541-0>.

Jakob, M.; Stein, D.; Ulmi, M. (2012). Vulnerability of buildings to debris flow impact. Natural Hazards Earths System Sciences 60:241–261.

Jesus, C. C.; Oliveira, S. C.; Sena, C.; Marques, F. (2017). Understanding constraints and triggering factors of landslides: Regional and local perspectives on a drainage basin, *Geosciences*, 8(1). <http://doi:10.3390/geosciences8010002>, 2018.

Jornal de Notícias (2018) Fonte
<https://www.jn.pt/local/noticias/beja/mertola/interior/festival-do-peixe-do-rio-de-mertola-commenos-espanhois-este-ano-5764643.html>, página visitada no dia 20/06/2018.

Julião, R. P.; Nery, F.; Ribeiro, J. L.; Branco, M. C.; Zêzere, J. L. (2009). Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de base municipal. Autoridade Nacional de Protecção Civil. Lisboa.

K

Kang, H.; Kim, Y. (2016). The physical vulnerability of different types of building structure to debris flow events. *Natural Hazards Earths System Science*, 80(3), 1475–1493.

Kappes, M. S.; Keiler, M. (2012). Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography*, 32(2), 577–590.

Kullberg, J. C.; Rocha, R.; Soares, A.; Rey, J.; Terrinha, P.; Callapez, P.; Martins, L. (2006). A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. em: Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P. e Kullberg, J. C. (Eds.) – *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria*. Universidade de Évora, Évora, 317-368.

Kullberg, J. C.; Rocha R. B.; Soares, A. F.; Rey J.; Terrinha, P.; Azerêdo, A. C.; Callapez, P.; Duarte L. V.; Kullberg, M. C.; Martins, L.; Miranda, R.; Alves, C.; Mata, J.; Madeira, J.; Mateus, O.; Moreira, M.; Nogueira, C. R. (2013). III.3. A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica in *Geologia de Portugal, Volume II – Geologia*

Meso-cenozóica de Portugal. Eds.: R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha & J. C. Kullberg, 2013, Escolar Editora, 317-368.

L

Lajas, S. (2016). Integração de métodos estatísticos e determinístico para a avaliação da suscetibilidade a deslizamentos superficiais. Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território a apresentar ao Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Lateltin, O.; Haemmig, C.; Raetzo, H.; Bonnard, C. (2005) Landslide risk management in Switzerland. *J Int Consort Landslides* 2(4):313–320.

Léone, F. (1996). Concept de Vulnérabilité appliqué a l'évaluation des Risques génères par lesphénomènes de Mouvements de Terrain. Thèse Doctorat de l'Université Joseph Fourier. GrenobleI. Documents du BRGM 250. Éditions BRG.

Leone, F.; Asté, J.-P.; Leroi, E. (1996). Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: working toward a better risk perception. *Landslides-Glissements de Terrain*. Balkema, Rotterdam, 263–270.

Léone F. (2007). Caracterisation des vulnerabilites aux catastrophes naturelles: contribution a une evaluation géographique multirisque. Montpellier: Universite Paul Valery – Montpellier III. Orléans.

M

Machado, M.J.G. (1991). Contribuição para o estudo da dinâmica da Bacia-vertente do Rio Grande da Pipa. Lisboa. Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica, apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa.

MacLeod A.; Hofmeister, R.; Wang, Y.; Burns, S. (2005). Landslide indirect losses: methods and case studies from Oregon. Department of Geology and Mineral Industries.

Martinelli, A.; Cifani, G. Cialone, G.; Corazza, L.; Petracca, A.; Petrucci, G. (2008). Building vulnerability assessment and damage scenarios in Celano (Italy) using a quick survey data-based methodology. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28 (2008) 875– 889.

Matos, L. (2008). Estabilidade de Taludes em Rochas Silto-Argilosas – Técnicas de Remediação para Roturas Superficiais. Dissertação de Mestrado em Geologia apresentada Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Mavrouli, O.; Fotopoulou, S.; Pitilakis, K.; Zuccaro, G.; Corominas, J.; Santo, A.; Cacace, F.; De Gregorio, D.; Di Crescenzo, G.; Foerster, E.; Ulrich, T. (2014). Vulnerability assessment for reinforced concrete buildings exposed to landslides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.

Michael-Leiba, M.; Baynes, F.; Scott, G. (2000). Quantitative landslide risk assessment of Cairns, Australia, in: *Landslides in research, theory and practice*, edited by Bromhead, E., Dixon, N., and Ibsen, M.-L., Thomas Telford, Cardiff, 1059–1064, 2000.

N

Nathan, F. (2005). Vulnerabilities to Natural Hazard: Case study on landslide risks in La Paz. Paper for the World International Studies Conference (WISC) at Bilgi University. Istanbul

O

Oliveira, S. C. (2012). Instabilidade geomorfológica na bacia do Rio Grande da Pipa (Arruda dos Vinhos). Dissertação de Doutoramento em Geografia na especialidade de Geografia Física a apresentar ao Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Oliveira, S. C.; Zêzere, J. L.; Catalão, J.; Nico, G. (2015). The contribution of PSInSAR interferometry to landslide hazard in weak rock-dominated areas, *Landslides*, 12(4), 703–719, doi:10.1007/s10346-014-0522-9, 2015.

Oliveira, S.C.; Zêzere, J.L.; Garcia, R.A.C; Pereira, S. (2016). Padrão de deformação de movimentos de vertente em áreas periurbanas associados a eventos de instabilidade. International Conference on Urban Risks, Lisbon, 30 Junho-2 Julho 2016, ISBN: 978-989-95094-1-2, pp 363-370. <http://www.ceru-europa.pt/icur2016/>

Oliveira, S. C.; Zêzere, J. L.; Lajas, S.; Melo, R. (2017). Combination of statistical and physically based methods to assess shallow slide susceptibility at the basin scale, *Natural Hazards Earths System Sciences*, 17, doi:10.5194/nhess-17-1091-2017, 2017.

P

Papathoma-Köhle, M.; Neuhäuser, B.; Ratzinger, K.; Wenzel, H.; Dominey-Howes, D. (2007). Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides. *Natural Hazards Earths System Sciences*. 7: 765 – 779.

Papathoma-Köhle, M.; Kappes, M.; Keiler, M.; Glade, T. (2011). State of the art and future needs.

Papathoma-Köhle, M.; Keiler, M.; Totschnig, R.; Glade, T. (2012). Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: debris flow event in South Tyrol *Natural Hazards*.

Papathoma-Köhle, M. (2016). Vulnerability curves vs. vulnerability indicators: application of an indicator-based methodology for debris-flow hazards. *Natural Hazards Earths System Sciences*, 16, 1771–1790, 2016.

Papathoma-Köhle, M.; Gems, B.; Sturm, M.; Fuchs, S. (2017). Matrices, curves and indicators. A review of approaches to assess physical vulnerability to debris flows. *Earth-Science Reviews*, 171: 272-288.

Peduto, D.; Ferlisi, S.; Nicodemo, G.; Reale, D.; Pisciotto, G.; Gullà, G. (2017). Empirical fragility and vulnerability curves for building exposed to slow-moving landslides at the medium and large scales. *Landslides*, 14: 1993-2007.

Persichillo, M.G.; Bordoni, M.; Meisina, C. (2017). The role of land use changes in the distribution of shallow landslides. *Science Total Environment* 574, 924–937.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.125>.

Petrucci, O.; Gullá, G. (2009). A Support Analysis Framework for mass movement damage assessment: applications to case studies in Calabria (Italy). *Natural Hazards Earths System Sciences*. 9: 315 – 326.

Pimenta, R. (2011). Avaliação da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente com métodos de base física. Dissertação de Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciência - Universidade de Lisboa.

Popescu, M. E. (1994). A suggested method for reporting landslide causes. *Bull IAEG* 50: 71-74.

Popescu, M. E. (2002). Landslide causal factors and landslide remedial options. Keynote Lecture. Proceeding of the 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures, Singapore, 61-81.

Puissant, A.; Van Den Eeckhaut, M.; Malet, J.-P.; Maquaire, O. (2013). Landslide consequence analysis: a region-scale indicator-based methodology. *Landslides* (2014) 11:843–858.

R

Reichenbach, P.; Galli, M.; Cardinali, M.; Guzzetti, F.; Ardizzone, F. (2005). Geomorphological mapping to assess landslide risk: concepts, methods and applications in the Umbria region of central Italy in Glade, T.; Anderson, M.; Crozier, M. J. (Eds.), *Landslide Hazard and Risk*. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester: 429 – 468.

Reis, E.; Zêzere, J.L.; Vieira, G.; Rodrigues, M.L. (2003). Integração de dados espaciais em SIG para avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos. *Finisterra XXXVIII*, 3–34. <https://doi.org/10.18055/finis1569>.

S

Santos, J. (1997). Instabilidade de vertentes e riscos de movimentos de terreno - o exemplo da área Vila Seca-Lama (sul de Coimbra). *Territorium*, ISSN 0872-8941, ISSN-e 1647-7723, N.º. 4, 1997, 79-98.

Schuster, R.L.; Highland, L.M. (2007). Overview of the Effects of Mass Wasting on the Natural Environment. *Environmental and Engineering Geoscience*, 13, 25-44. <http://dx.doi.org/10.2113/gseegeosci.13.1.25>.

Silva, M.; Pereira, S. (2014). Assessment of physical vulnerability and potential losses of buildings due to shallow slides. *Natural Hazards Earths System Sciences*, 72(2), 1029–1050. <http://doi.org/10.1007/s11069-014-1052-4>.

Soeters, R.; van Westen, C. L. (1996). Slope instability recognition, analysis, and zonation in Turner, A. K.; Schuster, R. L. (Eds.), *Landslides investigation and mitigation*. Transportation Research Board. National Academic Press, Washington D. C.. Special Report 247: 129 – 177.

Soldato, M.; Bianchini, S.; Calcaterra, D.; Vita, P.; Martire, D.; Tomás, R.; Casagli, N. (2017). A new approach for landslide-induced damage assessment. *Geomatics, Natural hazards and Risk*, 14.

Sørensen, R.; Zinko, U.; Seibert, J. (2006). On the calculation of the topographic wetness index : evaluation of different methods based on field observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10, 101–112.

Sterlacchini, S.; Frigerio, S.; Giacomelli, P.; Brambilla, M. (2007). Landslide risk analysis: a multi-disciplinary methodological approach. *Natural Hazards Earths System Sciences*, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 2007, 7 (6), 657-675.

Sterlacchini, S.; Akbas, S. O.; Blahut, J.; Mavrouli, O.; Garcia, C.; Quan Luna, B.; Corominas, J. (2014). Methods for the characterization of the vulnerability of elements at risk. In *Mountain Risks: From Prediction to Management and Governance* (233–273). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6769-0_8.

T

Tapsell, S.M.; Penning-Rowsell, E.C.; Tunstall, S.M.; Wilson, T. (2002). Vulnerability to flooding: health and social dimensions. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 360. 1511-1525.

Tarbotton, C.; Dall'Osso, F.; Dominey-Howes, D.; Goff, J. (2015). The use of empirical vulnerability functions to assess the response of buildings to tsunami impact: Comparative review and summary of best practice. *Earth-Science Reviews* 142 (2015) 120–134.

Totschnig, R.; Fuchs, S.; (2012). Vergleich von Vulnerabilitätskurven für Wildbachprozesse. In: Koboltschnig, G., Hübl, J., Braun, J. (Eds.), Internationales Symposium Interpraevent – Grenoble (23.-26. April), vol. 2. Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Klagenfurt, 1103–1114.

U

Uzielli, M.; Nadim, F.; Lacasse, S.; Kaynia, A. M. (2008). A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Engineering Geology*, 102(3–4), 251–256. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.011>.

Uzielli, M.; Catani, F.; Tofani, V.; Casagli, N. (2014). Risk analysis for the Ancona landslide—II: estimation of risk to buildings. Submitted as companion paper.

UNDRO (1984). Disaster prevention and mitigation — a compendium of current knowledge, vol 11. Preparedness Aspects, New York.

V

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes in Schuster, R. L.; Krizek, R. J. (Eds.), *Landslides analysis and control*. Transportation Research Board Special Report. Washington D. C. 176: 11 – 33.

Varnes, D. J. (1984). International Association of Engineering Geology – Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes – Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. UNESCO, Paris.

van Westen, C. J.; van Asch, T. W. J.; Soeters, R. (2006). Landslide hazards and risk zonation - why is it still so difficult?. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 65: 167 – 184.

W

Wisner, B.; Blaikie, P.; Cannon, T.; Davis, I. (2004). At Risk, Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters. Routledge, London, UK.

Winter, M.G.; Smith, J.T.; Fotopoulou, S.; Pitilakis, K.; Mavrouli, O.; Corominas, J.; Agyroudis, S. (2013). The physical vulnerability of roads to debris flow. Technical Committee 208.

Winter M. G.; Sherar B.; Palmer, D.; Peeling, D.; Harmer, C.; Sharpe, J. (2016). The Economic Impact of Landslide and Floods on the Road Network. Procedia Engineering Volume 143, 2016, 1425–1434 Advances in Transportation Geotechnics 3 . The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016).

Wong, H. N.; Ho, K. K. S.; Chan, Y. C. (1997). Assessment of consequence of landslides in Cruden, D. M.; Fell, R. (Eds.) Landslide Risk Assessment. Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment. Honolulu. A. A. Balkema. Rotterdam: 111 – 149.

WP/WLI (International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory) (1993). A suggested method for describing the activity of a landslide. Bulletin International Association of Engineering Geology, 47: 53-57.

Y

Yin, K. L.; Yan, T. Z. (1988). Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks in Bonnard, C. (Ed.) Landslides. Proceedings of the 5th ISL, Lausanne. Vol. 2. Balkema, Rotterdam: 1269 – 1272.

Z

Záruba, Q.; Mencl, V. (1982). Landslides and Their Control: Development in Geotechnical Engineering. Elsevier, Amsterdam, 324.

Zbyszewski, G.; Assunção, C. T. (1965). Notícia Explicativa da folha 30-D Alenquer da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50.000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 104.

Zêzere, J. L. (1991). As costeiras a norte de Lisboa: evolução quaternária e dinâmica actual das vertentes. Finisterra: Revista Portuguesa de Geografia, vl 26.

Zêzere, J. L. (1997). Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa. Dissertação de doutoramento em Geografia Física apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. Lisboa.

Zêzere, J. L.; Reis, E.; Garcia, R.A.C.; Oliveira, S.; Rodrigues, M. L.; Vieira, G.; Ferreira, A. B. (2004). Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal), Natural Hazards Earths System Sciences, 4, 133–146, doi:10.5194/nhess-4-133-2004, 2004.

Zêzere J.L.; Oliveira, S.C.; Garcia, R.A.C. (2007). Landslide risk analysis in the area North of Lisbon (Portugal): evaluation of direct and indirect costs resulting from a motorway disruption by slope movements. Landslides, 4: 123-136.

Zêzere, J.L.; Ramos, C.; Reis, E.; Garcia, R.A.C.; Oliveira, S. (2008). Riscos e Protecção Civil – Diagnóstico Estratégico, Lisboa, CCDR-LVT, PROTOVT, 34.

Zêzere, J. L.; Trigo, R. M. (2011). Impacts of the North Atlantic Oscillation on Landslides, in Hydrological, Socioeconomic and ecological impacts of the North

Atlantic Oscillation in the Mediterranean Region, edited by S. Vicente-Serrano and R. Trigo, 199–212, Springer., 2011.

Zêzere, J. L.; Vaz, T.; Pereira, S.; Oliveira, S. C.; Marques, R.; Garcia, R. A. C. (2015). Rainfall thresholds for landslide activity in Portugal: a state of the art, *Environment Earth Science*, 73(6), 2917–2936, doi:10.1007/s12665-014-3672-0, 2015.

Zêzere, J.L.; Pereira, S.; Melo, R.; Oliveira, S.C.; Garcia, R.A.C. (2017). Mapping landslide susceptibility using data-driven methods. *Science of The Total Environment* 589, 250-267.